

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



## TRABAJO DE DIPLOMA

Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico.

**Título:** “Determinación y Evaluación de Riesgos en la Planta de Procesamiento de Crudo de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro”.

**Autora:** María Caridad Hernández Brizuela.

**Tutor:** Ing. Alejandro Díaz Linares.

Matanzas. Cuba.

2017

## *DECLARACIÓN DE AUTORIDAD.*

---

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



---

María Caridad Hernández Brizuela

## NOTA DE ACEPTACIÓN.

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

\_\_\_\_\_  
Presidente del Tribunal.

\_\_\_\_\_  
Firma.

\_\_\_\_\_  
Miembro del Tribunal.

\_\_\_\_\_  
Firma.

\_\_\_\_\_  
Miembro del Tribunal.

\_\_\_\_\_  
Firma.

\_\_\_\_\_  
Miembro del Tribunal.

\_\_\_\_\_  
Firma.

“Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la  
electricidad y la energía atómica:  
la voluntad”.

Albert Einstein

## **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. Mami y papi: sepan que es de ustedes casi tanto como mío.*

### **A mi hermano:**

*Por estar siempre al tanto de mis resultados y de mi bienestar. Por disfrutar de todos mis logros y estar orgulloso de mi. Por todos sus gestos de amor y su preocupación por lograr mi satisfacción académica. Mi hermano: te regalo estas líneas especialmente a ti. También dedico este triunfo a la familia hermosa que has creado y me has regalado, gracias por darme a Yanay, gracias por darme los niños. Sirva de ejemplo para ustedes Keilen y Kendri. Tía los ama.*

### **A mis abuelos:**

*Por dejarme ser su niña pequeña y complacerme en todo lo que pudieron. Aunque quizás no sepan ni qué está sucediendo en este momento, ni cuál es el motivo de estas líneas: las dedico con amor. A mi abuelo Ramiro en cualquier lugar del cielo donde esté.*

### **A mi Ale:**

*Por ser mi mayor ilusión y a quien debo todo mi amor. Por regalarme una convivencia tan especial día a día. Por ser mi amigo incondicional y mi*

*confidente. Por ser mi tutor de horas lentas. Por ser el 2,5 y más de mi carrera universitaria: sabes por qué te considero como tal. Por ser mi futuro esposo y con quien quiero formar mi familia. Te amo.*

## **AGRADECIMIENTOS.**

---

### ***A mi familia de origen:***

*Le agradezco su esfuerzo y confianza en mí, sus horas de preocupación y sus ratos de incertidumbre, su ejemplo de sacrificio y la grandeza en sus corazones.*

### ***A mi Ale:***

*Sabes que no me alcanza la vida para agradecerte. Te agradezco ser tú y haberme elegido.*

### ***A la familia Badía Díaz; mi familia:***

*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. Gracias Maxi por darme tu apoyo y conocimientos durante mis prácticas laborales.*

### ***A mi familia materna:***

*Aunque estén lejos sé que están pendientes de mí. Gracias por estar ahí.*

### ***A mis tíos Mary y Giorgio:***

*Agradezco su preocupación y sus esfuerzos desde la distancia para facilitar mis estudios.*

***A mis amistades:***

*Yeli, Drichel, Daima, Genlys y Leyanet: qué suerte haberlos conocido. Javier, Lisandra, Idaimis, Lienz y Esthercita: gracias por compartir juntos estos últimos cinco años. Niurka y Juan Carlos: gracias por ser padres y amigos. Robe y Adielis: Espero sigamos juntos hasta el final.*

***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 gracias a mi mamá, quien además de educarme me enseñó durante tres cursos y a Santiago, por ayudarme a desempeñar este trabajo.*

## 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 la Segunda Etapa de Separación y el almacén de nafta y sus correspondientes probabilidades, siendo el escenario más frecuente la formación de una Nube Tóxica. 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 y se establece que las afectaciones económicas por concepto de reposición de equipos pueden ascender hasta los \$ 100 039 312.

## **Abstract**

*The present work is carried out in the Plant of Processing of Crude Oil corresponding to the Enterprise of Perforation and Extraction of Petroleum of the Center. In it decide the scenarios of risks that they can occur in the Second Stage of Separation and the Warehouse of Naphtha and their corresponding probabilities, being the more frequent the formation of a toxic cloud. Moreover, it is evaluated by means of the ALOHA Software the areas of dangerous atmospheres for the different scenarios being the one of bigger area the BLEVE. It is establish the human affectations by means of Probit for effects of radiation and overpression and it is established that the economic affectations on account of replacement of equipments can ascend until \$100 039 312.*

## Índice

Acápites	Contenidos	Página
	Introducción.	1
<b>Cap. 1</b>	Análisis bibliográfico.	4
<b>1.1</b>	Características y propiedades físico-químicas de las sustancias involucradas en el proceso.	4
<b>1.2</b>	Accidentes mayores. Principales escenarios de riesgos.	9
<b>1.2.1</b>	Incendio y explosión.	9
<b>1.2.2</b>	Principales escenarios de riesgos.	11
<b>1.3</b>	Métodos de análisis y evaluación de riesgos en plantas de procesos tecnológicos.	20
<b>1.3.1</b>	Métodos de análisis cualitativos y cuantitativos o semicuantitativos.	20
<b>1.3.2</b>	Evaluación de atmósferas peligrosas. Programas informáticos más utilizados.	35
<b>1.3.3</b>	Método para la determinación de afectaciones humanas. Ecuaciones " <i>Probit</i> ".	37
<b>1.4</b>	Conclusiones parciales.	38
<b>Cap. 2</b>	Materiales y métodos.	39
<b>2.1</b>	Breve descripción de la planta.	39
<b>2.2</b>	Caracterización de las sustancias sujetas a análisis.	41
<b>2.3</b>	Descripción de las técnicas de análisis y evaluación a utilizar.	43
<b>2.3.1</b>	Metodología para el Análisis Histórico de Accidentes.	43
<b>2.3.2</b>	Metodología para el Árbol de Sucesos.	44
<b>2.3.3</b>	<i>Software ALOHA</i> . Características fundamentales.	48
<b>2.3.4</b>	Método " <i>Probit</i> ".	54
<b>2.3.4.1</b>	Vulnerabilidad a la radiación térmica.	55
<b>2.3.4.2</b>	Vulnerabilidad a explosiones.	56
<b>Cap. 3</b>	Presentación y análisis de los resultados.	59
<b>3.1</b>	Análisis del Árbol de Sucesos.	59
<b>3.1.1</b>	Análisis del Árbol de Sucesos para un escape de gas natural en la <i>SES</i> .	59
<b>3.1.2</b>	Análisis del Árbol de Sucesos para un derrame de nafta en el almacén de nafta de la <i>ECO</i> .	67
<b>3.2</b>	Análisis de las áreas de atmósferas peligrosas obtenidas mediante <i>ALOHA</i> .	74
<b>3.2.1</b>	Consideraciones a tener en cuenta para la evaluación de áreas de atmósferas peligrosas por <i>ALOHA</i> .	74
<b>3.2.2</b>	Análisis de las áreas de atmósferas peligrosas obtenidas para el escenario Nube Tóxica.	76
<b>3.2.3</b>	Análisis de las áreas de atmósferas peligrosas obtenidas para el escenario <i>VCE</i> .	84

<b>3.2.4</b>	Análisis de las áreas de atmósferas peligrosas generadas por un <i>Jet Fire</i> en la SES.	87
<b>3.2.5</b>	Análisis de las áreas de atmósferas peligrosas generadas por un <i>Pool Fire</i> en el almacén de nafta.	89
<b>3.2.6</b>	Análisis de las áreas de atmósferas peligrosas generadas por la <i>BLEVE</i> en el almacén de nafta.	90
<b>3.3</b>	Análisis de resultados alcanzados por " <i>Probit</i> ".	92
<b>3.3.1</b>	Análisis de vulnerabilidad por efectos de radiación térmica.	92
<b>3.3.1.1</b>	Análisis de vulnerabilidad por efecto de la radiación térmica generada por el <i>Jet Fire</i> .	93
<b>3.3.1.2</b>	Análisis de vulnerabilidad por efecto de la radiación térmica generada por el <i>Pool Fire</i> .	94
<b>3.3.1.3</b>	Análisis de vulnerabilidad por efecto de la radiación térmica generada por la <i>BLEVE</i> .	95
<b>3.3.2</b>	Análisis de vulnerabilidad por efectos de explosión.	99
<b>3.4</b>	Análisis económico.	101
<b>3.5</b>	Conclusiones parciales.	104
	Conclusiones.	105
	Recomendaciones.	106
	Bibliografía.	107
	Anexos.	113

## **Introducción**

La industria del petróleo y sus derivados a nivel mundial evidencia cada día más su desarrollo y crecimiento; situación por la cual se requiere de esfuerzos técnicos e investigativos para lograr la estabilidad tecnológica y la seguridad industrial que necesita. Nuestro país desde hace varias décadas cuenta con la posibilidad de explorar, explotar yacimientos, tratar crudos extraídos, comercializar y refinar petróleo nativo. 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 y el 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. El análisis y la evaluación de estos riesgos para toda instalación que procese sustancias combustibles, cobra significativa importancia. Esta temática se ha abordado mundialmente con la seriedad que implican sus resultados hace aproximadamente 33 años, período en que tuvo lugar el desastre tecnológico de Bhopal en la India, como resultado de una cadena de negligencias donde perdieron la vida alrededor de 3000 personas y otras 20000 quedaron inhabilitadas. Este drama constituye la mayor catástrofe ambiental industrial y es a la vez el inicio del actual análisis de

riesgos en plantas químicas. Otros accidentes como la explosión del reactor nuclear en Chernobyl 2 años más tarde, considerado el desastre nuclear más importante en la historia y el incendio de los pozos petroleros en Kuwait provocado por Irak en 1988, donde se quemaron 400000 toneladas de petróleo diarias durante 5 días y se emitieron en forma de nube más de 105000 toneladas de dióxido de azufre han reafirmado la imperante necesidad de realizar, analizar y divulgar análisis de riesgos en instalaciones de procesos. Precisamente en la PPC, objeto de estudio de la presente investigación no se han realizado con anterioridad análisis de riesgos, así como evaluación de atmósferas explosivas, por lo que se propone el siguiente problema científico.

**Problema Científico:**

Se desconocen los posibles riesgos y la magnitud de las afectaciones ante la ocurrencia de accidentes mayores en la PPC de la EPEP-Centro.

**Hipótesis:**

Si se complementan las técnicas de determinación de riesgos con las de evaluación se puede determinar la evolución de los distintos escenarios de riesgos desde sus probabilidades de ocurrencia hasta la magnitud de sus afectaciones materiales y humanas.

**Objetivo general:**

Determinar y evaluar los posibles escenarios de riesgos que pueden tener lugar en la PPC.

**Objetivos específicos:**

1. Establecer las metodologías de análisis y evaluación de riesgos más adecuadas a las condiciones de la PPC.

2. Determinar los posibles escenarios de riesgos y su probabilidad de ocurrencia.
3. Evaluar las áreas de atmósferas peligrosas resultantes de los posibles escenarios de riesgos que puedan tener lugar.
4. Analizar las posibles afectaciones humanas y económicas que se puedan derivar de los escenarios de riesgos.
5. Recomendar cambios y medidas en caso de ser necesario para evitar o mitigar escenarios de riesgos.

## Capítulo 1: Análisis bibliográfico.

En este capítulo 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-químicas de las sustancias involucradas en el proceso tecnológico.

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

- Petróleo crudo nativo. PCN.

*Oilfield Review*, (2015) expresa que su nombre proviene del latín “*petroleous*”, que a su vez se deriva de las voces latinas “*petra*” (piedra) y “*oleous*”, (aceite). Es una mezcla compuesta de hidrocarburos líquidos, compuesto en mayor medida de carbono e hidrógeno, con pequeñas cantidades de nitrógeno, oxígeno y azufre. Su composición química depende de ciertos componentes químicos en el petróleo, así como de la unión de estos en elementos más complejos. Su importancia radica en las características que cada uno de estos elementos le confiere al petróleo.

Ruano, (2013) plantea que está formado por cadenas moleculares de hidrocarburos con pequeñas cantidades de derivados que contienen oxígeno, nitrógeno y azufre con trazas de constituyentes metálicos. Frecuentemente se encuentra el agua emulsionada en el crudo a veces hasta en un 30%, es un líquido combustible con apariencia aceitosa, espumosa, negra y viscosa.

Vanderwert *et al.*, (1981) añade que el petróleo es la mayor fuente de hidrocarburos que existe en la naturaleza, está compuesto por hidrocarburos saturados e insaturados, entre los hidrocarburos saturados se encuentran las parafinas y los cicloalcanos o naftenos, mientras los insaturados están formados por las olefinas y los aromáticos. Esta clasificación sirve de base para la caracterización y clasificación de los crudos, además de dar una idea precisa del comportamiento que debe esperarse de estos compuestos.

Según Bogomolov, (1984) los crudos parafínicos son muy estables por su poca reactividad, son muy fluidos y de color claro y proporcionan una mayor cantidad de naftas y lubricantes. Los nafténicos son muy viscosos y de oscura coloración, cuando llegan a oxidarse dan lugar a la formación de ácidos nafténicos los cuales actúan de manera muy corrosiva sobre los metales y tras el proceso de refinación generan una gran cantidad de residuos. Los mixtos son una combinación de los parafínicos y de los nafténicos, son muy reactivos y se combinan con hidrógeno, oxígeno, cloro y azufre para formar gomas, resinas y lacas entre otros productos. Según la composición predominante de estos hidrocarburos los crudos suelen clasificarse en crudos de base parafínica, de base asfáltica o de base mixta.

Por su densidad API (“Instituto de Petróleo Americano”), la cual se expresa como gravedad API, se establece que a mayor valor de gravedad API estos serán más livianos, los más livianos son los más requeridos en el mercado, y al mismo tiempo los de mayor precio. Por la presencia de azufre se establecen de la siguiente forma: Dulce y Agrio, el petróleo dulce es aquel que contiene menos de 0.5% de contenido sulfuroso, tiene muy alta calidad y es ampliamente usado para ser procesado como gasolina mientras el agrio recibe características contrarias. (*Schlumberger*, 2015)

Algunas de sus propiedades físico-químicas son:

Punto de inflamación: 61 °C (No es inflamable a temperatura ambiente.)

Gravedad específica: 0.9780 mg/l

Punto de combustión: 91 °C

Presión de vapor: menor a 1 psia

- Gas natural del petróleo. GNP.

Fuentes, (2010) define el gas natural como una mezcla homogénea en proporciones variables de hidrocarburos parafínicos, su componente principal es el metano cuyo componente varía generalmente entre 90 y 98% molar, contiene también etano, propano, butano y componentes de menor proporción más pesados, también tiene en menores proporciones gases inorgánicos como el dióxido de carbono, monóxido de carbono, nitrógeno, sulfuro de hidrógeno, dióxígeno y vapor de agua entre otros. Todos estos contaminantes se consideran impurezas del gas natural y realmente causan serios problemas operacionales como son la formación de hidratos por condensación del vapor de agua y el aumento acelerado de la corrosión en los equipos de proceso. Se puede encontrar como gas asociado y gas no asociado, dando esto una medida del gas que acompaña al crudo desde el yacimiento o de los yacimientos netamente gasíferos respectivamente. Se considera que el gas natural tiene una serie de ventajas sobre otros combustibles debido a su seguridad por el hecho de tener límites de inflamabilidad en rangos tan estrechos (de 4% a 14%) y una alta temperatura de ignición.

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

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

Tc: -75.56 °C

Pc: 4601 KPa

Densidad media: 15.37 kg/m<sup>3</sup>

Viscosidad media: 0.0129 cP

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

➤ Sulfuro de Hidrógeno. H<sub>2</sub>S.

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

Según *ENFORM*, (2015) es un gas incoloro, más pesado que el aire en su estado más puro y extremadamente tóxico. En bajas concentraciones, tiene olor a huevo podrido y causa irritación en los ojos y en la garganta. En concentraciones elevadas puede causar la muerte. Se encuentra en una amplia variedad de procesos industriales, además de la industria del petróleo, en la producción de pulpa y papel y en el tratamiento de las aguas residuales. Es también conocido como gas ácido, gas amargo o gas que apesta. Entre sus características y propiedades físico-químicas y toxicológicas se encuentran las siguientes:

Temperatura de Ebullición: -59.5 °C

Densidad: 1.19 g/cm<sup>3</sup>, más denso que el aire que posee 1.0

Límite superior de inflamabilidad: 46%

Límite inferior de explosividad: 4%

Concentraciones menores a 1 ppm: Puede olerse

Concentraciones entre 20 y 50 ppm: Irritación de ojos, garganta y pulmones

Concentraciones entre 200 y 500 ppm: Cefaleas, mareos, pérdida de conciencia

Concentraciones mayores de 500 ppm: Desmayo fatal al cabo de 1 hora.

➤ Nafta.

La nafta según la “*National Fire Protection Association*,” (2008) es un líquido amarillo claro transparente, aromático y volátil, obtenido como producto de la destilación fraccionada del petróleo crudo, por lo que su estructura molecular se asemeja a la del crudo. Es un producto estable e inflamable a temperatura ambiente en presencia de fuentes de ignición por lo que debe evitarse su exposición a llamas, chispas y calor.

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

Para su estudio generalmente se trabaja con valores promedios según *PETROBRAS*, (2010) los cuales se definen a continuación:

Temperatura de ebullición: 36 °C

Autoinflamabilidad: 280-456 °C

Densidad: 0.760 g/cm<sup>3</sup>

Tensión superficial: 19-23 dinas/cm<sup>2</sup> a 25 °C

Viscosidad: a 30 °C menor de 1cSt

Punto de inflamación: Se expresa en el rango siguiente: (-43°C a -30°C)

Por las características expuestas anteriormente para cada una de las sustancias caracterizadas cabe destacar la peligrosidad inherente a ellas, por lo que se hace meritorio el análisis de riesgos por incendio y explosión debido a sus características combustibles y de inflamabilidad.

## **1.2 Accidentes mayores. Principales escenarios de riesgos.**

Es evidente que la definición de accidentes mayores es tan amplia, desde el punto de vista técnico, que debe ser matizada con elementos adicionales que permitan una clasificación objetiva de cualquier situación de esta clase. Casal *et al.*, (2001).

La “Legislación Española de Emergencias” 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.

### **1.2.1 Incendio y explosión.**

Entre los principales accidentes que pueden ocurrir en la industria química de forma general, se considera que el incendio, el cual se traduce como “fuego que va más allá de los límites”, es aquel que menor radio de acción tiene, aunque sus consecuencias pueden ser nefastas debido a la agresividad de su calor de reacción, el cual puede provocar efectos colaterales terribles. (Casal *et al.*, 2001)

García-Roca *et al.*, (1993) define la explosión como “el equilibrio en un breve período de tiempo de una masa de gases en expansión contra la atmósfera que la envuelve. Si la energía necesaria para la expansión de los gases procede de una reacción química, se dice que la explosión es química; es el caso de las explosiones derivadas de fenómenos de combustión donde están involucrados gases inflamables, de explosiones derivadas de reacciones incontroladas y de explosiones asociadas a la ignición o descomposición de sustancias explosivas. Si la energía procede de la liberación repentina de un gas comprimido o de la expansión rápida de vapores, se trata de una explosión física”.

Casal *et al.*, (2001) la define 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”. 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”. Existen varios tipos de explosiones accidentales como son:

- Explosiones de vapores confinados.
- Explosiones de nube de vapor no confinadas.
- Explosiones de recipientes.
- Explosión por ignición de polvo combustible en suspensión.

Vílchez *et al.*, (1995) en su estudio de la Base de datos *MHIDAS*, analizó 5325 registros desde principios de siglo hasta el año 1992 y observó un incremento de

los incidentes del 95% en los últimos 30 años del período evaluado, lo que se corresponde con el crecimiento ramificado de la industria química e impone cada vez más la necesidad de realizar análisis de riesgos. En el 50% de los casos que analiza ocurrió un escape, mientras el incendio y la explosión tuvo lugar en el 44 y 36% de los casos respectivamente, seguidos de la nube de gas para un 12%, se hace evidente que en algunos de los incidentes están presentes más de un tipo de accidente mayor puesto que la sumatoria porcentual es diferente de 100.

### 1.2.2 Principales escenarios de riesgos.

- Incendio de gases.

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

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

Planas-Cuchi *et al.*, (1997) y Casal *et al.*, (2001) afirman que este tipo de incendio tiene lugar cuando se produce el vertido accidental de vapores o gases inflamables a presión, en áreas de proceso o depósitos de almacenaje.

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

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. (Fernández, 2008).

Casal *et al.*, (2001) señala que la geometría de este tipo de incendio se puede determinar mediante dos modelos determinados, los cuales dependen de si hay o

no presencia de viento. Sin presencia de viento se utiliza el modelo de *Hawthorn*, el cual permite determinar la longitud efectiva de la llama turbulenta. En presencia de viento, aunque existen más modelos, el más usado es el modelo de *Kalghatgi*, el cual presupone que la llama del dardo puede asemejarse a un cono y mediante ecuaciones totalmente empíricas calcula la inclinación, altura y anchura de la llama.

➤ Nube de gas inflamable.

Este tipo de incendio tiene lugar cuando se produce el vertido de un gas o un vapor inflamable, de manera que se forma una nube que se va dispersando hasta que encuentra una fuente de ignición. El escape puede ser instantáneo o continuo. Estas nubes pueden estar originadas también por el vertido de un líquido que en condiciones atmosféricas experimente un *flash* o que se evapore muy rápidamente. Los incendios de nubes de vapor tienen una duración muy corta, de unos cuantos segundos y esto dificulta su estudio y la obtención de datos experimentales confiables. (Planas-Cuchi, 1996; Planas-Cuchi *et al.*, 1997 y Casal *et al.*, 2001)

“No es siempre fácil distinguir entre explosión o incendio de una nube de gas. Sin embargo, se puede decir que en el segundo caso los efectos de la presión pueden considerarse despreciables, siempre que no existan obstáculos al propagarse el frente de llama, el cual se mueve desde el punto de ignición hacia el punto de fuga, a través de las zonas que se encuentran entre los límites de inflamabilidad”. (Ferrero, 2006).

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

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

➤ Lllamaradas. *Flash fire*.

“Es la llama progresiva de difusión, de baja velocidad. No produce ondas de presión significativas. Suele estar asociada a la dispersión de vapores inflamables a ras de suelo. Cuando éstos encuentran un punto de ignición, el frente de la llama generado se propaga hasta el punto de emisión, barriendo y quemando toda la zona ocupada por los vapores en condiciones de inflamabilidad. Si el origen de los vapores es un vertido con evaporación, el fenómeno acaba en un incendio de charco”. (Casal *et al*, 1999).

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

➤ Incendio de líquidos.

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

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

Los charcos de fuego al aire libre se originan cuando se produce un escape o vertido de un líquido combustible sobre el suelo y en el exterior. En caso de que se produzca la ignición del líquido derramado, el tipo de fuego resultante dependerá en gran medida de si el escape es continuo o instantáneo. Si el escape es instantáneo, el líquido se irá esparciendo hasta que encuentre una barrera o hasta que se haya consumido todo el combustible en el incendio. En caso de un escape continuo, el charco irá creciendo hasta que la velocidad de combustión iguale el caudal de vertido. De este modo se llega a un diámetro de equilibrio, que se mantiene mientras

no se detiene la fuga. Si el líquido queda retenido dentro de algún recipiente o área protegida, como puede ser una cubeta, el incendio no dependerá tanto de si el escape es instantáneo o continuo. (Mudan,1984 y Casal *et al.*, 2001).

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

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

➤ Borbollón. *Boilover*.

Según Michaelis, (1995) y Garo y Vantelon, (1999) el *boilover* o borbollón puede producirse sobre todo en depósitos que contienen mezclas de diversos hidrocarburos. Si en uno de estos depósitos se produce un incendio la capa superficial de hidrocarburo se va calentando hasta entrar en ebullición, experimentando un proceso de destilación: los componentes más volátiles son los que pasan preferentemente a vapor, alimentando la llama. De esta forma, al irse enriqueciendo en los componentes más pesados esta capa superficial va aumentando su temperatura. A medida que transcurre el tiempo, esta capa rica en productos pesados aumenta de espesor, progresando en profundidad; la velocidad a la que aumenta su espesor es mayor que la velocidad a la que retrocede la superficie del líquido contenido en el depósito. De esta forma una “onda de calor” se propaga hacia la parte inferior del depósito. Si el mismo contiene agua, en forma de capa acuosa o de emulsión, en algún momento esta ola de calor (a una temperatura superior a la de ebullición del agua) llegará a la capa acuosa. Esto provocará una cierta vaporización inicial del agua; la turbulencia de este fenómeno

provocará la mezcla de ambas capas, con una fuerte vaporización de agua. La generación prácticamente instantánea de una gran cantidad de vapor, con un volumen específico muy superior al del líquido, provocará una violenta erupción, con la formación de una bola de fuego y la proyección del combustible hacia el exterior. Dada la violencia del fenómeno, el combustible inflamado puede ser proyectado hasta distancias considerables.

Carro, (2008) muestra una definición más clara pero esencialmente igual para este tipo de fenómeno: “es el fenómeno que se presenta durante el incendio de tanques de almacenamiento que contienen petróleo crudo o hidrocarburos pesados, el cual ocurre, cuando residuos de la superficie encendida, se vuelven más densos que el producto no incendiado formando una capa caliente que avanza hacia abajo más rápidamente que el líquido que regresa a la superficie. Cuando esta capa caliente alcanza el agua o la emulsión agua aceite depositada en el fondo del tanque, se provoca un calentamiento y eventualmente la ebullición súbita del agua, con lo cual, el producto fluye explosivamente hacia arriba, originando la expulsión de aceite incendiado, asociado con un incremento repentino de la intensidad del fuego”.

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

- *Boilover* de capa gruesa. *Hot zone boilover*.
- *Boilover* de capa fina. *Thin layer boilover*.

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

Michaelis, (1995) afirma que no todos los combustibles son susceptibles de experimentar el fenómeno del *boilover*; en general éste está asociado a aquellos

combustibles compuestos por una serie de componentes con una amplia gama de temperaturas de ebullición, constituyendo así un buen ejemplo el crudo pesado del petróleo.

Entre las condiciones necesarias para que ocurra un *boilover* definidas por Casal *et al.*, (2001) se encuentran las siguientes:

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

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

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

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

➤ *BLEVE* + bola de fuego.

*BLEVE*, acrónimo de la expresión inglesa "*Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion*". "Este escenario se refiere a la bola de fuego (*fireball*) que se produce por el estallido súbito y total, por calentamiento externo, de un recipiente que contiene un gas inflamable licuado a presión, cuando el material de la pared pierde resistencia mecánica y no puede resistir la presión interior. El calentamiento extremo es generalmente producido por un incendio de charco o de dardo de fuego, y la probabilidad de que estalle es especialmente elevada en los casos en los que hay un contacto directo de la llama con la superficie del recipiente". (Casal *et al.*, 2001).

“La *BLEVE* es un caso especial de estallido catastrófico de un recipiente a presión en el que ocurre un escape súbito a la atmósfera de una gran masa de líquido o gas licuado a presión sobrecalentados”, según Bestraten y Turmo, (1999).

Montiel, (1987); Fernández-Cámara, (1990) y Bestraten, (1991) definen las siguientes condiciones para la existencia de la *BLEVE*:

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

➤ Nube Tóxica.

Según Fernández, (2008) la Nube Tóxica se define como “la dispersión de vapores en forma de nube con concentraciones tales, capaces de provocar afectaciones para la salud”.

Para describir la evolución de nubes tanto inflamables como tóxicas en la atmósfera y hacer posible su modelización, es muy importante conocer el grado de estabilidad atmosférica que existe. (Casal *et al.*, 2001 y EPA, 2016). Las distintas variables meteorológicas afectan en menor o mayor grado la dispersión atmosférica de

contaminantes, y a su vez, estas presentan una gran variabilidad estacional diaria. (Viatela, 2007 y Rodríguez *et al.*, 2014).

Entre las principales variables meteorológicas que afectan la dispersión de nubes de contaminantes definidas por Casal *et al.*, (2001) 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 y el viento, según su estabilidad se caracterizan según Pasquill de la siguiente forma:

**Tabla 1.1:** Clases de atmósfera según su estabilidad.

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

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

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

- A. Muy estable
  - B. Inestable
  - C. Ligeramente inestable
  - D. Neutra
  - E. Ligeramente estable
  - F. Estable
- La temperatura y la humedad relativa: Básicamente son consecuencias de la estación del año, se utilizan para el cálculo de la velocidad de evaporación de un líquido además de, utilizarse en las ecuaciones de dispersión de gases pesados. La humedad del aire solo tiene efectos significativos sobre la dispersión de un contaminante si existe reactividad entre el contaminante y el vapor de agua presente en la atmósfera, tiene también otro efecto significativo si el gas que se tiene que dispersar está a una temperatura más baja que la ambiente. En este último caso, la humedad afecta al balance energético de las masas de gas y aire implicadas en la dispersión 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. A continuación, quedarán definidos algunos de ellos.

### **1.3 Métodos de análisis y evaluación de riesgos en plantas de procesos tecnológicos.**

#### **1.3.1 Métodos de análisis cualitativos y cuantitativos o semicuantitativos.**

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

- Métodos cualitativos.
  - Análisis histórico de accidentes. AHA.
  - Listas de comprobación. Check lists
  - Análisis preliminar de riesgos. Preliminary Hazard Analysis. PHA.
  - Análisis (¿Qué pasa si ... ?). What If ... ?
  - Análisis funcional de operatividad. HAZOP.
  - Análisis del modo y efecto de los fallos. FMEA.
  - Análisis del modo, efecto y criticidad de los fallos. FMEAC.
- Métodos semicuantitativos o cuantitativos.
  - Índice *DOW* de fuego y explosión.
  - Índice *Mond*.
  - *Union des Chambres Syndicales de L'Industries du Pétrole*. UCSIP.
  - Árboles de Fallos.
  - Árboles de Sucesos.
  - Análisis causa-consecuencia.

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

clasificación relativa del riesgo asociado a una planta química o a partes de la misma.

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

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

Pese a las limitaciones aparentes de estas técnicas de análisis, debe señalarse su versatilidad y su amplia utilización. En realidad, la experiencia demuestra que, en una gestión del riesgo adecuada, basada siempre en la identificación correcta el número de accidentes tiende a disminuir paralelamente a la disminución de la magnitud de sus consecuencias.

➤ Análisis Histórico de Accidentes.

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

La técnica se basa en una recopilación de accidentes con productos químicos en forma de banco de datos donde se encuentra almacenada la información relativa a los mismos. La recogida sistemática de información relativa a diferentes accidentes ocurridos en el pasado en plantas químicas y actividades

afines ha permitido, en algunos casos, la acumulación de datos concretos sobre una determinada situación, equipo u operación: carga o descarga de cisternas, transporte de mercancías peligrosas, procesos de fabricación de un producto determinado, parques de almacenamiento, vertido de líquidos inflamables, escape de un gas tóxico, entre otras. Los accidentes ocurridos en el pasado constituyen un conjunto de “datos experimentales”, obtenidos a menudo a un precio muy elevado, relativos a un campo en el que resulta casi imposible la experimentación a escala real: explosiones de todo tipo, confinadas y no confinadas, de polvo, de gas, *BLEVE*, incendios, formación de nubes tóxicas, entre otras. El conocimiento exacto de las condiciones en que se ha producido un accidente determinado: masa involucrada, dimensiones de la nube, condiciones atmosféricas, y sus consecuencias: radiación e impacto a diversas cotas y distancias, daños a personas y construcciones, permite contrastar y validar los modelos teóricos de predicción de efectos de este tipo de accidentes. Sin esta información, estos modelos únicamente se pueden contrastar, en el mejor de los casos, con la experimentación a pequeña escala, actualmente desarrollada en pocos centros de investigación. La recogida de información debe efectuarse de forma sistemática, teniendo especificado con claridad qué datos deben registrarse y con qué nivel de detalle. Entre los bancos de datos actuales

más importantes se destacan los siguientes: *MHIDAS*, *FACTS*, *AICHE*, *OREDA*, *WOAD*, *MARS* y *SONATA*, cada uno complementado con miles de accidentes de todo el mundo y con la descripción necesaria y suficiente para el análisis de riesgos.

Las principales limitaciones del Análisis Histórico de Accidentes son:

- La instalación objeto de estudio no es exactamente igual a las que ya han sufrido accidentes.
  - La información de los accidentes suele ser incompleta y en muchas ocasiones, inexacta o de uso restringido.
  - No da información sobre todos los accidentes posibles sino únicamente sobre los que han sucedido y se han documentado hasta la fecha.
  - El acceso a los bancos de datos implica un cierto costo.
- Listas de Comprobación.

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

reglamento o procedimiento determinado. (“Dirección General de Protección Civil y Emergencias”, 2016).

➤ Análisis Preliminar de Riesgos.

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

- Materias primas, productos intermedios o finales y su reactividad.
- Equipos de planta.
- Límites entre componentes de los sistemas.
- Entorno de los procesos.
- Operaciones (pruebas, mantenimiento, puesta en marcha, paradas, etc.).
- Instalaciones.
- Equipos de seguridad.

Los resultados de este análisis incluyen recomendaciones para reducir o eliminar estos peligros, estos deben ser registrados de forma que se vea claramente los peligros identificados, la causa, la consecuencia potencial y las diferentes medidas

preventivas o correctivas. Este método requiere relativamente poca inversión en su realización, puede ser realizado por solamente dos técnicos no necesariamente expertos en la materia por lo que es adecuado para examinar los proyectos de creación de nuevas capacidades o de ampliación de capacidades ya existentes. En instalaciones existentes no es un método adecuado para entrar en el detalle de los riesgos asociados a las mismas.

➤ Análisis *What if...?*

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

➤ Análisis de Peligro y Operatividad.

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

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

cada una de las operaciones fue planeada y así poder identificar cuáles son las posibles consecuencias, planteadas a través de “palabras guía”.

Zoltán, (2010) y Sánchez, (2016) señalan que el estudio *HAZOP* se basa en analizar en forma metódica y sistemática el proceso, la operación, la ubicación de los equipos y del personal en las instalaciones, la acción humana (de rutina o no) y los factores externos, revelando las situaciones riesgosas. Se enfoca en determinar cómo un proceso puede apartarse de sus condiciones de diseño y sus condiciones normales de operación, planteando las posibles desviaciones que pudieran ocurrir. Una vez identificada una desviación, se hace una evaluación en cuanto a que si sus consecuencias pueden producir un efecto negativo sobre el funcionamiento seguro y eficiente de la planta. En caso necesario, se recomiendan medidas para eliminar la causa que produce la desviación o para mitigar las consecuencias de su materialización.

Para simplificar el estudio de *HAZOP* conviene subdividir un proceso grande y complejo en tantas piezas pequeñas como sea requerido para el análisis. Para ello el facilitador prepara, previo a las reuniones del grupo, la división de los diagramas de tuberías e instrumentación. (Rausand, 2005)

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

Los participantes proponen para cada desviación las posibles causas que la pudieran originar; existen tres tipos de causas: error humano, falla del equipamiento y eventos externos. Para cada causa planteada, se determinan las consecuencias derivadas y las salvaguardas existentes en la instalación, ya sea para evitar la ocurrencia de dicho evento o para mitigar su efecto. Las consecuencias encontradas

se categorizan, asignándoles valores de riesgo en función de la probabilidad y severidad que el equipo determina para dicho evento. El grupo decide, entre todos los valores disponibles de probabilidad y severidad que se encuentran en la matriz de clasificación de riesgos, cuáles asignará a dicha consecuencia y por consiguiente surge la tabla de riesgos de la misma. (Juárez, 2014).

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

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

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

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

Los efectos son el resultado de la consideración de cada uno de las fallas identificadas individualmente sobre el conjunto de los sistemas de la planta o instalación. El método *FMEA* establece finalmente que las fallas individuales pueden afectar directamente o contribuir de una forma destacada al desarrollo de accidentes de una cierta importancia en la planta. Es un método válido en las etapas

de diseño, construcción y operación y se usa habitualmente como fase previa a la elaboración de árboles de fallas, ya que permite un buen conocimiento del sistema.

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

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

➤ Índice *Dow* y *Mond*.

Casal *et al.*, (2001) y Juárez, (2014) señalan que estos índices proporcionan un método directo y relativamente simple de estimar el riesgo global asociado con una unidad de proceso, así como jerarquizar las unidades en cuanto al nivel de riesgo. No son, por lo tanto, sistemas que se utilicen para señalar riesgos individuales, sino que proporcionan un valor numérico que permite identificar áreas en las que el riesgo potencial alcanza un nivel determinado.

El índice *Dow* de incendio y explosión, se utiliza ampliamente en la industria química, debido a que permite realizar una estimación algo más fácil de visualizar por el uso preferente de gráficas frente a ecuaciones logrando con esto, contabilizar riesgos intrínsecos del material, las cantidades manejadas, cantidades de operación

y en la más reciente edición tiene en cuenta, si bien de manera marginal, aspectos de toxicidad, con la inclusión de una penalización específica.

Metodología.

1. Identificar en un plano de localización general, todas las unidades de proceso que puedan representar riesgos mayores. Las unidades de proceso que pueden considerarse riesgosas son: tanques de almacenamiento, compresores, intercambiadores de calor, bombas, reactores, etc.

2. Determinar el factor material de cada uno de los equipos. El factor material es un número comprendido entre 1 y 40, que se asigna a la sustancia que se procesa en la unidad, de acuerdo con el potencial intrínseco de esta etapa para liberar energía en un incendio o en una explosión.

3. Determinar los factores de riesgo concurrentes, los cuales pueden ser de dos tipos:

- Riesgos generales (**F1**), como la presencia de reacciones exotérmicas o la realización de operaciones de carga y descarga.
- Riesgos específicos del proceso (**F2**), como la operación cerca del intervalo de inflamabilidad o a presiones distintas de la atmosférica.

4. Una vez calculado **F1** y **F2**, se está en condiciones de obtener el factor de riesgo de la unidad **F3** como producto de las anteriores que generalmente están comprendidos entre el 1 y 8 los cuales se utilizan para hallar el valor de índice de incendio y explosión.

5. Calcular el área de exposición; esta área es un círculo ideal dentro del cual estarán los equipos e instalaciones que pueden verse afectados por un incendio o por una explosión en la unidad de proceso que se evalúa.

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

➤ Árbol de Fallos.

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

Nolan, (2011) añade que el árbol de fallos es una técnica que se enfoca en un incidente en particular, a menudo llamado evento inicial, y entonces se construye un diagrama de sucesiones lógicas de todas las secuencias de eventos concebibles que puede llevar a ese incidente.

El primer paso para la elaboración de un árbol de fallos es un estudio previo del sistema o proceso que se quiere analizar con el fin de determinar los incidentes susceptibles de ser analizados. Una vez determinados los accidentes que se quieren analizar, deben establecerse los límites de la instalación. Seguidamente, es necesario identificar los fallos de los elementos y las relaciones lógicas que conducen al accidente. El proceso finaliza cuando todos los fallos identificados son primarios y no es posible determinar sus causas. (Casal *et al.*, 2001 y Nolan, 2011).

La elaboración de árboles de fallos requiere una elevada formación técnica, junto con un conocimiento detallado del sistema o proceso y de sus modos de fallo. Además, se requiere que por lo menos la información sobre el proceso sea completa en las partes más esenciales. El nivel de detalle de la información disponible condiciona el nivel de detalle del análisis. (NASA, 2002 y “Dirección General de Protección Civil y Emergencias”, 2016)

Según Casal *et al.*, (2001) la limitación principal de la metodología es que únicamente se pueden representar fallos “totales”, es decir, siempre se considera el fallo completo del elemento involucrado en la cadena de sucesos que conduce al accidente y representan fotografías instantáneas del proceso. Además, para su análisis y desarrollo se requiere de mucho tiempo y personal especializado con un conocimiento completo de la planta. Señala que genera recomendaciones de mejoras muy concretas y que muestra un modelo gráfico en forma de árbol invertido que ilustra la combinación lógica de fallos parciales que conducen al fallo de sistema.

➤ Árbol de Sucesos.

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

Wells, (2003) señala que los Árboles de Sucesos son la mejor herramienta para el análisis de consecuencias. Son usados para realizar un análisis probabilístico. Se organiza mediante una estructura de árbol en la que cada bifurcación se decide a partir de la ocurrencia de un fenómeno u otro.

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

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

1. Identificar el evento iniciador que generalmente es un evento de fallo correspondiente al escape de un material peligroso.
2. Identificar el desarrollo del incidente.
3. Construir el árbol de eventos. Este es construido de izquierda a derecha, en cada nodo se muestran las alternativas analizadas.
4. Clasificar los resultados del incidente.
5. Estimar la posibilidad de ocurrencia de cada suceso.
6. Clasificar los resultados y determinar su probabilidad.

Díaz, (2013) afirma que, a partir de los estudios de los registros históricos de accidentes realizados por Wells, (2003) éste define las probabilidades de ocurrencia de sucesos tales como: la aparición de un escape, la posibilidad de una ignición inmediata, el tipo de clima, la explosión de la nube de vapor, la intrusión de una llama y las acciones de mitigación. Algunas de las probabilidades son:

- Probabilidad de ignición inmediata produciendo un dardo de fuego: 0.1
- Probabilidad de que no ocurra ignición inmediata: 0.9
- Probabilidad de explosión de la nube de vapor con estabilidad atmosférica D: 0.25
- Probabilidad de explosión de la nube de vapor con estabilidad atmosférica F: 0.66
- Probabilidad de la *BLEVE*: 0.5
- Probabilidad de piscina de fuego (ignorada para caso de gas): 0

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

**Tabla 1.2:** Escala de probabilidad cuantitativa y cualitativa.

Frecuencia	Escala de probabilidad
1 en 10	Frecuente
1 en 100	Probable
1 en 1000	Ocasional
1 en 10000	Remoto
1 en 100000	Improbable
1 en 1000000	Extremadamente remoto

**Fuente:** Santos, (2010).

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

Autores como Casal *et al.*, (2001) y Wells, (2003) le atribuyen ventajas a esta técnica muy similares a las de los árboles de fallos y entre sus limitaciones principales citan:

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

### 1.3.2 Evaluación de atmósferas peligrosas. Programas informáticos más utilizados.

#### 1. ALOHA: “Areal Locations of Hazardous Atmospheres”.

Castro *et al.*, (2013) y Piedra y Valdivieso, (2013) coinciden en que ALOHA es un programa computarizado diseñado específicamente para el uso de personas que respondan a la evaluación de accidentes químicos, así como para la planificación y entrenamiento de emergencias. Puede predecir las tasas a las cuales los vapores químicos pueden escapar a la atmósfera desde tuberías de gas rotas, fugas de tanques, y charcos de evaporación. Predice además como una nube de gas peligrosa puede dispersarse en la atmósfera después de una descarga química accidental.

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

Para su uso prácticamente se siguen los siguientes pasos:

- Indicar la ciudad donde está ocurriendo una descarga accidental y la hora y la fecha del accidente.
- Elegir el producto químico de interés de la biblioteca de información del *Software*.
- Introducir información sobre las condiciones meteorológicas actuales.
- Describir en qué forma el producto escapa del contenedor.

- Pedir a *ALOHA* que presente una huella, en la que se muestre la zona donde las concentraciones químicas en el aire pueden llegar a ser lo suficientemente altas como para presentar un riesgo para las personas.

Es un modelo de dispersión aérea que se puede usar como herramienta para predecir el movimiento y dispersión de los gases, predice concentraciones contaminantes a favor del viento desde la fuente de un derrame, tomando en cuenta las características físicas del material derramado. Da cuenta de algunas de las características del sitio del derrame, las condiciones meteorológicas y las circunstancias de la descarga.

Este *Software* está certificado por el CITMA para obtener la dispersión de los contaminantes en la atmósfera y determinar su posible área de alcance.

Entre sus limitaciones principales se encuentran las siguientes:

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

## 2. *OiRA*: “Evaluación de riesgos interactiva en línea”.

Según la “Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo”, (2016) *OiRA* es una plataforma *web* que permite la creación de herramientas de evaluación de riesgos sectoriales en cualquier lengua y de un modo fácil y normalizado. Está basada en el instrumento de evaluación de riesgos neerlandés denominado *RI&E*. El propósito de la herramienta *OiRA* es realizar la evaluación de riesgos eficazmente en microempresas y pequeñas empresas donde exista desconocimiento total de la gestión y evaluación del riesgo laboral.

OIRA propone un enfoque en varios pasos, desde la identificación de los riesgos a una evaluación documentada de los mismos, es capaz de guiar a los usuarios a través del proceso desde el primer paso: identificación de los riesgos, hasta el último: elaboración de un plan de acción o generación de una evaluación de riesgos documentada. Esta herramienta generalmente se desvía hacia otro tipo de industria muy diferente de la industria química como por ejemplo a los trabajadores de peluquería, panaderías y conductores de camión entre otros.

### 3. *DEGADIS. "Dense Gas Dispersion Model".*

Según Spicer y Havens, (2002) y Castro *et al.*, (2013) fue originalmente desarrollado para los Guardacostas de USA y el Instituto de Investigación del Gas primordialmente para la simulación de la dispersión de gases criogénicos inflamables. La implementación de *DEGADIS* en una computadora personal se patrocinó por el Instituto de Investigación del Gas y el Instituto Americano Del Petróleo, donde actualmente se usa con veracidad.

Existen además otros programas informáticos cuyo objetivo es la evaluación de atmósferas peligrosas entre los que se pueden citar a *CALPUFF*, *CALMET*, *Stoffenmanager* y *DISPER 5.2*.

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

Medina, (2003) y Domínguez, (2014) apuntan que es un método estadístico que nos da una relación entre la función de probabilidad y una determinada carga de exposición a un riesgo, es un método muy destacado entre los modelos de vulnerabilidad, los cuales son basados en experiencias realizadas con animales de laboratorio o estudios de muertes y lesiones de accidentes ocurridos. El valor *Probit* permite determinar el porcentaje de la población expuesta que se verá afectada a un determinado nivel de lesiones o por muerte a causa de una carga de exposición

determinada, dichos valores se encuentran tabulados como parte indispensable de aplicación del método.

#### **1.4 Conclusiones Parciales.**

1. El gas natural del petróleo y la nafta presentan características y propiedades significativas, por lo que se consideran sustancias meritorias de análisis de riesgos.
2. Los escenarios de riesgos más probables en Plantas de Procesamiento de Crudo son: nubes de vapor inflamables y tóxicas, *Jet Fires*, *Flash Fires*, *Pool Fire*, *BLEVE* y *boilover* de capa gruesa.
3. El Análisis Histórico complementado con el Árbol de Sucesos resultan técnicas de análisis de riesgos muy efectivas para determinar la frecuencia de ocurrencia de los posibles escenarios de riesgo.
4. El *Software* más adecuado para la evaluación de atmósferas explosivas es *ALOHA*.
5. Las ecuaciones *Probit* son adecuadas y relativamente sencillas para determinar las posibles afectaciones humanas ante accidentes mayores.

## Capítulo 2: Materiales y métodos.

En todas las investigaciones científicas realizadas en plantas de procesos es muy importante el conocimiento de las características fundamentales de la instalación, esto posibilita la comprensión del objeto de la investigación y la interpretación de los resultados que se puedan obtener. Las técnicas analíticas que se emplean para alcanzar los resultados esperados como respuesta a los objetivos propuestos pueden ser, desde las más sencillas hasta las más densas y de difícil interpretación. Precisamente aquí radica la importancia del desarrollo del presente capítulo, en la información que brinda respecto a las características de la planta y a las técnicas de análisis que se utilizarán.

### 2.1 Breve descripción de la planta.

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. La PPC cuenta con 2 piscinas de recepción de crudos conectadas entre sí con capacidad de 120 m<sup>3</sup> cada una, cinco intercambiadores de calor en espiral, cuatro separadores horizontales en la Segunda Etapa de Separación (SES) situadas a 17m de altura con un volumen de 100 m<sup>3</sup> cada una. Su objetivo es separar los componentes crudo-gas. El flujo de gas se dirige en su mayoría hacia un separador horizontal seguido de otro vertical donde quedan atrapadas las partículas de arrastre y fracciones ligeras que condensan en las líneas, situados en el área de la SES y de ahí es succionado por el compresor de la planta *ENERGAS*, el gas que no se envía a los compresores es quemado en el *flare* de la planta. La salida para petróleo de cada separador horizontal está encaminada al tanque de tratamiento dinámico, este tanque posee un volumen de 1600 m<sup>3</sup> y un sistema de recuperación de gases, el crudo de salida es propulsado por bombas hacia el área de tratamiento estático la

cual cuenta con dos tanques de 5000 m<sup>3</sup> y dos de 10000 m<sup>3</sup>, de esta área es trasegado por oleoducto a la Estación Cabecera del Oleoducto (ECO) mediante bombas, es almacenado en cuatro tanques de 5000 m<sup>3</sup> y bombeado por oleoducto hacia Matanzas. 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.

La presente investigación está encaminada fundamentalmente a las áreas correspondientes a la SES y al almacén de nafta, por lo que se caracterizan a continuación con más detalles cada una de ellas.

### **Segunda Etapa de Separación. SES.**

La SES está integrada por una batería de cinco intercambiadores de calor en espiral cuya función es elevar la temperatura del crudo hasta aproximadamente 70 °C a través de un sistema automático que mantiene el *set point* de temperatura y la presión del crudo en 8 atm, el crudo precalentado pasa a cuatro balas separadoras de 100 m<sup>3</sup> cada una ubicadas a 17m de altura donde ocurre la separación gas-crudo, el nivel de crudo en las balas se mantiene garantizando una presión de hasta 0.9 atm manométricas, valor que se controla a través de una válvula automática. A su vez el sistema posee una válvula de seguridad para el gas, que acciona si la presión supera las 2 atm. El gas recuperado pasa a través de dos separadores, uno horizontal y otro vertical conectados en serie mediante un ducto de 6" para eliminar cuanta impureza puede traer de la separación por arrastre de líquido antes de ser enviado a *ENERGAS* y al *flare*. El crudo separado pasa por gravedad al tanque 6 (*buffer* o de tratamiento dinámico) que mantiene un volumen operacional de 1095 m<sup>3</sup>, donde se continúa calentando el crudo y se separan gases remanentes de las balas a través de un sistema de recuperación de gases ubicado en la columna del tanque. El gas obtenido en la cabeza del tanque se une al gas separado en las balas en los separadores de arrastre. El crudo es bombeado desde aquí hacia los tanques

de proceso. La SES no posee anillos de enfriamiento ni sistema de espuma contraincendios.

### **Almacén de nafta.**

El almacén de nafta está ubicado en el área de la ECO, integrado por cuatro tanques de 205 m<sup>3</sup> de capacidad cada uno de ellos, con una altura de 6 m y un volumen operacional de 180 m<sup>3</sup>. La nafta se recepciona a través de pailas y se descarga hacia los tanques por medio de 2 bombas descargadoras, además este almacén cuenta con 2 bombas dosificadoras. Este sistema de tanques no posee anillos de enfriamiento ni sistema de espuma contraincendios.

## **2.2 Caracterización de las sustancias sujetas a análisis.**

Según Orozco, (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.
  
- Datos Físicos.
  - Apariencia.
  - Punto de ebullición.
  - Punto de fusión.
  - Solubilidad.
  - Densidad.
  - TLV. Límite superior de inflamabilidad.
  - IPVS. Límite inferior de explosividad.
  - Punto de congelación.

- Temperatura de auto ignición.
  - Coeficiente de expansión.
  - Temperatura de inflamación.
  - Biodegradabilidad.
  - Corrosión.
  - Capacidad calorífica.
- Peligros para la salud.
- Concentración permisible.
  - Exposición permisible.
  - Emergencias.
  - Partes del cuerpo que afecta.
  - Forma de entrada al organismo.
  - Toxicidad.

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

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

**Fuente:** Orozco, (2015).

- Condiciones de almacenamiento y manipulación.
- Nombre del producto almacenado.
  - Forma del recipiente (cilíndrico, rectangular, vertical, horizontal, etc.).
  - Dimensiones del recipiente (largo, ancho, diámetro).
  - Material de construcción.

- Protección del recipiente (interior o exterior).
  - Existencia de accesorios en el recipiente y su localización.
  - Fecha de fabricación del recipiente.
  - Condiciones de almacenamiento de las sustancias.
  - Cantidad de sustancia almacenada.
  - Registro histórico de averías producidas en el recipiente. Casos de derrames, salideros, etc.
  - Tipo de averías producidas.
  - Condiciones de almacenamiento (presión, temperatura, etc.).
  - Características de los alrededores del recipiente.
- Condiciones para su uso en el proceso.
- Uso en el proceso.
  - Condiciones en las que se usa la sustancia (presión, temperatura).
  - Fallos ocurridos en estos equipos al operar con estas sustancias.
  - Material de construcción de los equipos donde es usada.
  - Protección del sistema de tuberías.

En los anexos 1a y 1b aparece la caracterización del gas natural del petróleo y de la nafta respectivamente.

### **2.3 Descripción de las técnicas de análisis y evaluación a utilizar.**

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

#### **2.3.1 Metodología para el Análisis Histórico de Accidentes.**

Según el Registro de Incidentes de la PPC en el período de 2006 a 2016, disponible en la propia planta se realiza un conteo detallado del número de incidentes de

interés para la investigación que han tenido lugar; entiéndase por incidentes de interés los siguientes:

- Escape de gas.

Averías en SES. (Incluye las balas separadoras, intercambiadores de calor, línea del *flare* y el tanque 6 o de tratamiento dinámico).

- Derrame de nafta.

Averías en el área de almacenamiento de nafta. (Rajadura en el cuerpo del tanque, salidero por la sección inferior o base del tanque).

Una vez detectados los incidentes se calcula la frecuencia anual de ocurrencia de los mismos de la siguiente forma:

$$\text{Frecuencia} = \text{número de incidentes} / 10 \quad \text{Frecuencia: } (a^{-1}) \quad (2.1)$$

Donde:

10: cantidad de años para los que se contabilizan los incidentes.

Número de incidentes: tomado del Registro de Incidentes de la planta.

Por esta vía se calcula para el gas, detectando los incidentes que se refieren al gas y de forma análoga para la nafta.

### **2.3.2 Metodología para el Árbol de Sucesos.**

La metodología para realizar el Árbol de Sucesos queda definida según Wells, (2003) de la siguiente forma:

7. Identificar el evento iniciador que generalmente es un evento de fallo correspondiente al escape de un material peligroso.
8. Identificar el desarrollo del incidente.

9. Construir el árbol de eventos. Algunas consideraciones a tener en cuenta son:
  - El Árbol de Sucesos debe ser construido de izquierda a derecha.
  - En cada nodo debe mostrarse cada alternativa de eventos que puede afectar de una manera u otra el desarrollo del accidente.
  - Cada suceso debe ser indicado sobre cada uno de los nodos, en los cuales la respuesta “sí” o “puede ocurrir” corresponde a la rama superior y “no” o “no puede ocurrir” corresponde a la rama inferior.
10. Clasificar los resultados del incidente. El Árbol de Sucesos se desarrolla tan lejos como sea el resultado que se quiere obtener en el estudio. Lo más razonable es llevar el análisis hasta la ocurrencia del accidente mayor.
11. Estimar la probabilidad de ocurrencia de cada suceso. A cada nodo, así como a la ocurrencia del suceso iniciador le corresponde una probabilidad de que ese suceso haya ocurrido.
12. Clasificar los resultados y determinar su probabilidad. La frecuencia de cada resultado es determinada multiplicando la frecuencia de ocurrencia del suceso iniciador con las probabilidades condicionales a lo largo de cada camino de desarrollo hasta el suceso final. El cálculo no asume la dependencia de sucesos parciales.

Wells, (2003) define la ruta metodológica para la determinación del Árbol de Sucesos y se basó en los datos obtenidos de la Base de Datos *MHIDAS*, los valores probabilísticos establecidos por él en cada una de las bifurcaciones para cada nodo de decisión pueden ser utilizados con gran confiabilidad y certeza, mas la autora de la presente investigación propone recalcularlos algunos de ellos por tener disponibilidad de datos aplicados a la planta objeto de estudio.

En la siguiente tabla se muestran los nodos de decisión que se expondrán en el Árbol de Sucesos correspondiente al capítulo 3 para el gas natural y se explica dónde se utilizan los calculados según la metodología de Wells, (2003) y dónde se utilizan los recalculados por la autora de la investigación.

**Tabla 2.2:** Nodos de decisión para el Árbol de Sucesos del gas natural y probabilidades utilizadas.

Nodos de decisión	Probabilidades utilizadas.
1. Tipo de atmósfera	Según la autora
2. Ignición inmediata	Según metodología Wells, (2003)
3. Ignición retardada	Según la autora
4. VCE	Según metodología Wells, (2003)
5. Aislamiento en SES	Según la autora
6. Lucha eficaz contra incendios	Según metodología Wells, (2003)
7. Intrusión de llama	Según metodología Wells, (2003)

**Fuente:** Elaboración propia.

A continuación, se explica el proceder utilizado por la autora para el cálculo de cada una de sus probabilidades.

1<sup>er</sup> nodo: Tipo de atmósfera.

1. Según las categorías de Pasquill establecidas para cada tipo de atmósfera se consulta cuáles de estas son las más probables para el día, para la noche y para el período de calma.
2. Según el Registro Climatológico de la Academia de Ciencias de Matanzas se toman los valores medios de las variables climatológicas y se establecen los dos tipos de atmósferas más probables.

3<sup>er</sup> nodo: Ignición retardada.

1. Se establecen inicialmente todas las fuentes de ignición probables dentro de la planta y en sus cercanías aledañas y, mediante la rosa de los vientos se ubican direccionalmente cada una de estas con respecto a la SES. (Ver anexo 2)

2. Mediante el *Software ALOHA* se determina cuáles son las “fuentes reales” de ignición. Una vez que éste muestre las áreas de atmósferas peligrosas, aquellas fuentes que se encuentren dentro de los límites de inflamabilidad serán las consideradas como “fuentes reales”.
3. La probabilidad de ocurrencia de la ignición retardada se determina como la sumatoria de la frecuencia de las direcciones del viento en las cuales se encuentran las “fuentes de ignición reales”. (Los valores de frecuencia se encuentran en el Registro Climatológico).
4. La probabilidad de que no ocurra la ignición retardada se busca convencionalmente de la forma:  $(1 - \text{probabilidad que ocurra})$ .

5<sup>to</sup> nodo: Aislamiento de la SES.

El aislamiento de la SES, propiamente dicho, se traduce como la operación de poner fuera de servicio la SES, es decir, desviar el flujo de crudo proveniente del campo hacia el tanque 14, sin pasar previamente por los intercambiadores de calor, las balsas separadoras y el tanque de tratamiento dinámico. A continuación, se explican los pasos para determinar dicho nodo:

1. Se contabilizan los incidentes ocurridos en la SES y de ellos se extraen aquellos donde se aisló la SES.
2. El número de incidentes donde se aisló la SES dividido por el total de incidentes mostrará la probabilidad de que quede aislada la SES.
3. La probabilidad de que no se aisle la SES se determina como:  $1 - \text{probabilidad de que se aisle la SES}$ .

Para el Árbol de Sucesos correspondiente a la nafta los nodos de decisión y las probabilidades quedan establecidos de la siguiente forma:

**Tabla 2.3:** Nodos de decisión para el Árbol de Sucesos de la nafta y sus probabilidades.

Nodos de decisión	Probabilidades utilizadas
1. Tipo de atmósfera	Según la autora
2. Ignición del charco	Según Sánchez, (2016)
3. VCE.	Según la autora
4. Acciones de mitigación	Según Wells, (2003)

**Fuente:** Elaboración propia.

Metodología propuesta para calcular las nuevas probabilidades.

El primer nodo de decisión y el tercero se calculan de forma análoga a los calculados para el gas.

### 2.3.3 **Software ALOHA. Características fundamentales.**

Según Díaz, (2013) se utiliza la versión 5.4.1 de febrero del 2007, la cual reporta resultados confiables. Una de las características que posee es que emplea una serie de términos no conocidos relacionados con la ocurrencia del fuego, explosiones, y otros escenarios peligrosos, a lo cual se hace referencia:

- Se modelan tres categorías peligrosas:
  - Dispersión de gas tóxico
  - Fuegos
  - Explosiones
- Se basan en los modelos de dispersión del aire para estimar el movimiento y dispersión de la nube de gas químico.

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

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

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

Algunos de los términos usados son:

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

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

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

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

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

- Se utilizan tres valores de *LOC*, medidos en kW/m<sup>2</sup>
  - Rojo: 10 kW/m<sup>2</sup>. Potencialmente letal en el intervalo de 60 segundos.
  - Naranja: 5 kW/m<sup>2</sup>. Quemaduras de segundo grado en el intervalo de 60 segundos.
  - Amarillo: 2 kW/m<sup>2</sup>. 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
- *VCE*

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

Otras particularidades del *Software* son:

Debe trabajarse con cuidado para predecir diferentes situaciones, las cuales son consideradas sus limitantes:

- Velocidades del viento muy bajas.
- Condiciones atmosféricas muy estables.
- Irregularidades de la concentración del compuesto químico particularmente cerca de la fuente.

Además, el modelo no incorpora efectos de:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

usarse los valores del *IDLH* para identificar definitivamente condiciones peligrosas en términos generales.

### 2.3.4 Método “*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.

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

$$Pr = a + b \ln V \quad (2.2)$$

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. Con este valor se busca el porcentaje de personas implicadas en la siguiente tabla.

**Tabla 2.4:** Equivalencia entre valores *Probit* y porcentaje de la 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	5,96	83	6,48	93	7,46	99,3
3,25	4	3,92	14	4,29	24	4,59	34	4,85	44	5,10	54	5,36	64	5,64	74	5,99	84	6,55	94	7,51	99,4
3,36	5	3,96	15	4,33	25	4,61	35	4,87	45	5,13	55	5,39	65	5,67	75	6,04	85	6,64	95	7,58	99,5
3,45	6	4,01	16	4,36	26	4,64	36	4,90	46	5,15	56	5,41	66	5,71	76	6,08	86	6,75	96	7,65	99,6
3,52	7	4,05	17	4,39	27	4,67	37	4,92	47	5,18	57	5,44	67	5,74	77	6,13	87	6,88	97	7,75	99,7
3,59	8	4,08	18	4,42	28	4,69	38	4,95	48	5,20	58	5,47	68	5,77	78	6,18	88	7,05	98	7,88	99,8
3,66	9	4,12	19	4,45	29	4,72	39	4,97	49	5,23	59	5,50	69	5,81	79	6,23	89	7,33	99	8,09	99,9

**Fuente:** Domínguez, (2014).

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

### 2.3.4.1 Vulnerabilidad a radiaciones térmicas.

Se emplea para determinar el porcentaje de personas afectadas por los efectos de las radiaciones térmicas en función de la intensidad de irradiación recibida y del tiempo de exposición 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 *TNO* presenta las ecuaciones “*Probit*” siguientes:

$$\text{Quemaduras mortales: } Pr = -37,23 + 2,56 \ln (t I^{4/3}) \quad (2.3)$$

$$\text{Quemaduras de segundo grado: } Pr = -43,14 + 3,0188 \ln (t I^{4/3}) \quad (2.4)$$

$$\text{Quemaduras de primer grado: } Pr = -39,83 + 3,0186 \ln (t I^{4/3}) \quad (2.5)$$

Donde:

t = Tiempo efectivo de exposición en segundos.

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

#### **2.3.4.2 Vulnerabilidad a explosiones.**

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

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

Las ecuaciones “*Probit*” para estas consecuencias se han tomado de Domínguez, (2014) y se desglosan a continuación:

- Rotura de tímpano

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

$$Pr = - 15,6 + 1,93 \ln P \quad (2.6)$$

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

- Muerte por impacto del cuerpo

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

$$Pr = - 46,1 + 4,82 \ln J \quad (2.7)$$

Donde J = impulso originado por la sobrepresión durante el tiempo de actuación (Ns/m<sup>2</sup>).

- Lesiones por impacto del cuerpo

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

$$Pr = 39,1 + 4,45 \ln J \quad (2.8)$$

Donde J = impulso (Ns/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. TNO indica que los proyectiles con una energía cinética de 100 J pueden ocasionar víctimas mortales.

### Capítulo 3: Presentación y análisis de los resultados.

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

#### 3.1 Análisis del Árbol de Sucesos.

A continuación, se muestran los principales resultados obtenidos de la confección del Árbol de Sucesos para el gas natural y la nafta, y sus análisis correspondientes.

##### 3.1.1 Análisis del Árbol de Sucesos para un escape de gas natural en la SES.

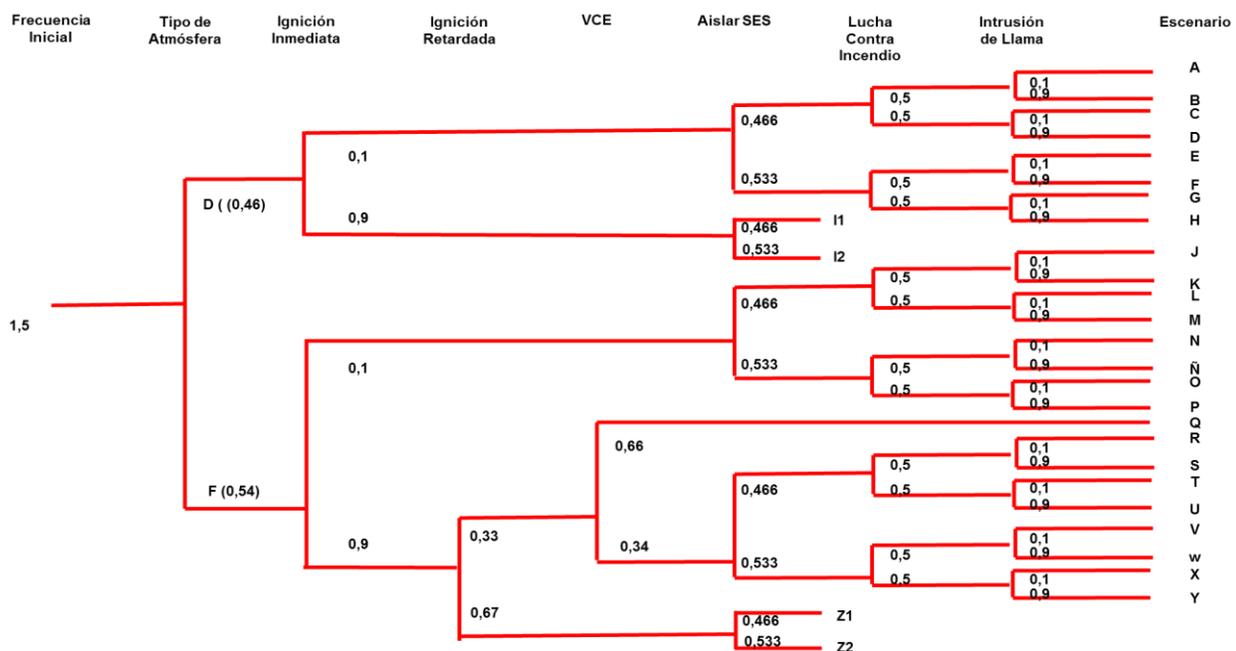


Fig. 3.1: Árbol de Sucesos para el gas natural en la SES.

Fuente: Elaboración propia.

En la fig. 3.1 se muestra el Árbol de Sucesos correspondiente a un probable escape de gas natural en el área de SES.

Para la confección de este árbol teniendo en cuenta que la metodología establece la determinación de un suceso iniciador fue necesario determinar la frecuencia de ocurrencia de escapes de gas en dicha área, la frecuencia de ocurrencia se determina a través de un Análisis Histórico de Accidentes. Éste análisis se realiza basándose en un Registro Histórico de Incidentes de la PPC de los últimos 10 años. En este período fueron registrados 15 escapes de gas natural, lo cual arroja una frecuencia de  $1,5 \text{ a}^{-1}$ , valor este notablemente alto en comparación con resultados mostrados por Wells, (2003) que se encuentran en el orden de  $10^{-4} \text{ a}^{-1}$ . Los resultados numéricos de los escenarios finales del árbol se muestran en el anexo 3.

Una vez determinada la frecuencia del suceso iniciador se determinan las probabilidades correspondientes a cada uno de los nodos de decisión del árbol.

Las estabilidades atmosféricas correspondientes al primer nodo de decisión se establecen teniendo en cuenta la Tabla de Categorías de estabilidad de Pasquill, (ver tabla 1.1) así como otras consideraciones respecto a las horas de insolación o día y de noche o nublado, y a las frecuencias y direcciones de los vientos correspondientes al terral y las brisas. Pasquill establece que las mayores estabilidades atmosféricas corresponden a las horas de noche y las menores a los días. Teniendo en cuenta la ubicación de la PPC se puede concluir que las brisas provienen de direcciones del viento entre el N y el E, correspondientes éstas a las horas de día y a las mayores velocidades del viento como se muestra en el anexo 10, lo cual favorece la inestabilidad atmosférica. El terral, correspondiente a las horas de noche proviene de direcciones entre el S y el W, donde las velocidades del viento son notablemente menores, por lo que se favorece la estabilidad. Como se observa, éste análisis coincide plenamente con las categorías de Pasquill de estabilidad. Visto esto, se establecen las horas de día con estabilidad “D” y las noches con “F”, determinadas en función de las condiciones atmosféricas de la zona. Casal *et al.*, (2001) consideran que las horas de día o insolación están

comprendidas desde una hora después del amanecer hasta una hora antes del anochecer, estableciendo que amanece a las 7:00 a.m. y anochece a las 8:00 p.m. se tendrán 11 horas de día y 13 horas de noche y por tanto, probabilidades de 0,46 y 0,54 para estabilidad “D” y “F” respectivamente.

Las probabilidades correspondientes a la ignición inmediata se toman de la bibliografía especializada correspondiente a Wells, (2003).

Basado en la metodología establecida para la determinación de las probabilidades de una ignición retardada se establecen las posibles fuentes de ignición, así como su ubicación respecto a la fuente de emisión y las distancias hasta las mismas, como se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 3.1:** Posibles fuentes de ignición ante un escape de gas natural en la SES.

<b>Fuente de ignición</b>	<b>Ubicación respecto a la fuente</b>	<b>Dirección del viento</b>	<b>Distancia a la fuente. (m)</b>
<i>Flare</i> de PPC	SSW	NNE	224
<i>Flare</i> de ENERGAS	WSW	ENE	447
Calderas	NNW	SSE	247
Taller mecánico	NNW	SSE	323
Grupo electrógeno	NNW	SSE	292
Bombas Magistrales	WSW	ENE	119
Turbinas ENERGAS	W	E	244
Taller eléctrico	NE	SW	364

**Fuente:** Elaboración propia.

Una vez establecidas las fuentes de ignición se evalúa mediante el *Software ALOHA* cada una de estas direcciones del viento en ambas estabilidades y las condiciones atmosféricas del área para el escenario nube inflamable. Las longitudes de las áreas de atmósferas peligrosas se muestran en el anexo 4a donde los *LOC* corresponden al 10, 60 y 100% del *LEL*. Para ello se establece que las áreas que superen el 60% del *LEL* tendrán condiciones de inflamabilidad.

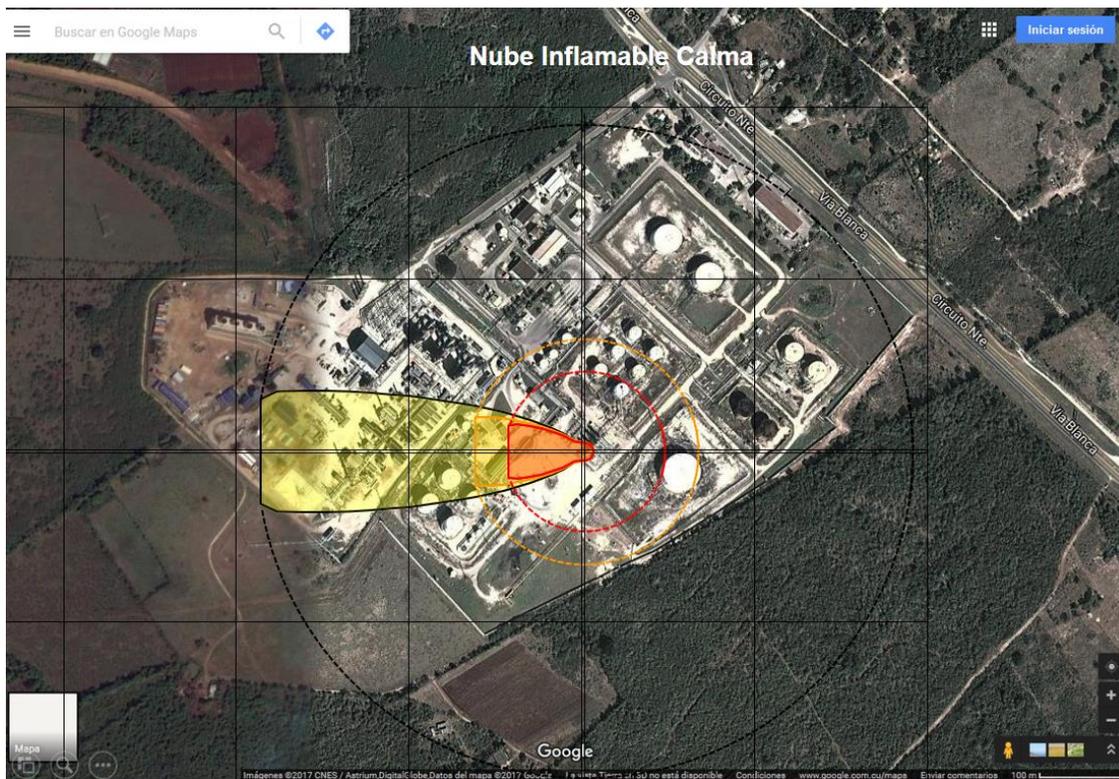
La siguiente tabla muestra las posibles áreas con potencial de ignición para las estabilidades “D” y “F” en función de las fuentes de ignición.

**Tabla 3.2:** Distancias con potencial de ignición ante un escape de gas natural en SES.

Fuente de ignición	Distancia de SES a la fuente de ignición. (m)	Distancias con potencial de ignición. (m)	
		Estabilidad “D”	Estabilidad “F”
<i>Flare</i> de PPC	224	59	75
<i>Flare</i> de <i>ENERGAS</i>	447	58	73
Calderas	247	61	79
Taller mecánico	323	61	79
Grupo electrógeno	292	61	79
Bombas Magistrales	119	58	73
Turbinas <i>ENERGAS</i>	244	58	74
Taller eléctrico	364	63	84
<b>CALMA</b>		<b>126</b>	

**Fuente:** Elaboración propia.

La dimensión de las áreas muestra que bajo las condiciones de estabilidad “D” las posibles fuentes de ignición siempre se encuentran fuera de las zonas con condiciones inflamables. Para estas mismas direcciones y estabilidad “F” las zonas con características inflamables tampoco alcanzan las fuentes de ignición, sin embargo, en las condiciones de Calma, se alcanzan condiciones de inflamabilidad hasta los 126 metros, encontrándose las Bombas Magistrales a 119 metros de la fuente de emisión; por lo que se designa el área de las Bombas Magistrales como “fuente real de ignición”. La siguiente figura muestra cómo se ve implicada el área de las Bombas Magistrales dentro del área naranja correspondiente a valores del LOC- 2.



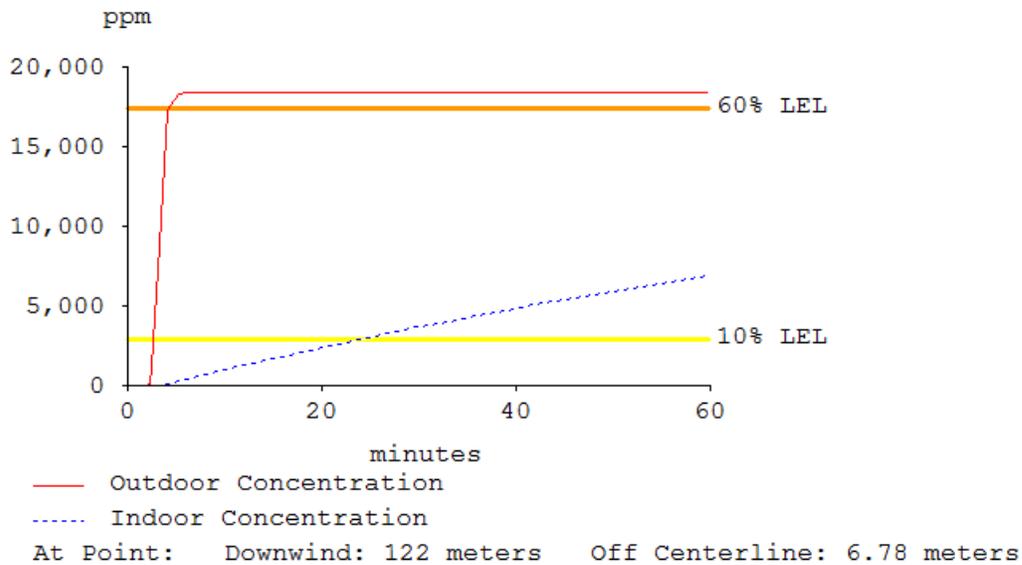
**Fig. 3.2:** Nube inflamable bajo condiciones de Calma en SES.

**Fuente:** Elaboración propia.

Para este mismo escenario en las diferentes direcciones del viento evaluadas se muestran los resultados en el anexo 4a.

Analizado lo anterior queda establecida la frecuencia correspondiente al estado de Calma (0,33) como la probabilidad de una ignición retardada. La frecuencia de las diferentes direcciones del viento y del estado de Calma se muestran en el anexo 10 en la tabla 10f.

Según Wells, (2003) la *VCE* se verifica en atmósferas con estabilidades “D” y “F” con una probabilidad de 0,25 y 0,66 respectivamente, pues según Santos, (2010) las nubes, aunque posean condiciones inflamables y se encuentren en presencia de una fuente de ignición, no necesariamente explotarán, sino que pueden formar una llamarada incapaz de originar sobrepresión. En el caso de estudio dado que se determina que bajo estabilidades “D”, nunca la nube alcanza las posibles fuentes de ignición con condiciones de inflamabilidad, y no ocurrirá pues la explosión de la nube, se desecha esta posibilidad, y se tiene solamente una Nube Tóxica bajo estas condiciones. En condiciones estables donde sí existe probabilidad de ignición retardada se asume el valor obtenido por Wells, (2003) y se considera entonces la explosión de la nube. Según Santos, (2010) la *VCE* ocurre generalmente en un período de tiempo comprendido entre 1 y 15 minutos después de ocurrir la avería y solo en casos escasos ocurre en tiempos superiores a éste; en el caso de estudio la nube con condiciones de inflamabilidad alcanza la fuente de ignición, (Bombas Magistrales) a los 6 minutos aproximadamente como se muestra en la figura 3.3.



**Fig. 3.3:** Comportamiento de la concentración de la nube de gas natural en estado de Calma a los 122 metros de la fuente.

**Fuente:** ALOHA, (2017).

Este resultado coincide con el período de tiempo establecido por Santos, (2010), en consulta con el Jefe de Turno Alejandro Díaz de la PPC se constata que las operaciones para poner fuera de servicio la SES pueden demorar entre 15 y 30 minutos dependiendo de la disponibilidad de operadores y la distancia a la que se encuentren estos del área, dado que este tiempo excede el tiempo en que se alcanza la fuente de ignición y además el rango establecido por Santos, (2010) no se tiene en cuenta el aislamiento de la SES como una posibilidad para la VCE.

Para el resto de las cadenas de sucesos se tiene en cuenta la probabilidad de aislamiento de la SES, procedimiento que debe llevarse a cabo para minimizar los riesgos y afectaciones ante una avería. Esta probabilidad se determina también a partir del Registro de Incidentes mediante un Análisis Histórico, teniendo en cuenta el total de averías y en cuántas de ellas se aisló el área. Solamente en 7 de las 15 averías, se procedió operacionalmente a aislar la SES, para un valor probabilístico de 0,46 y por consiguiente, un 0,54 de probabilidad de veces donde no se aisló.

Para las acciones de mitigación o lucha contra incendios Wells, (2003) define que deben establecerse las probabilidades de ocurrencia o no, iguales a 0,5 cada una de ellas. De igual forma interviene en el nodo correspondiente a la intrusión de llama, donde acentúa que la posibilidad de que ocurra intrusión de llama tiene un valor de 0,1 mientras la posibilidad de que no exista, será igual a 0,9.

Establecidas las probabilidades de cada nodo, basados en la cadena de sucesos y lo reportado por la bibliografía; se determinan los distintos escenarios que pueden tener lugar y sus correspondientes frecuencias de ocurrencia, los cuales se muestran en el anexo 3, donde se le asigna a cada escenario producto de una cadena de sucesos una letra.

La siguiente tabla muestra los posibles escenarios y su frecuencia total probable. La frecuencia total de ocurrencia para cada escenario, se determina como la sumatoria de las frecuencias de todas aquellas cadenas de sucesos que tengan como resultado el mismo escenario. Obteniéndose de esta manera la tabla que se muestra a continuación.

**Tabla 3.3:** Frecuencias totales de los escenarios obtenidas en el Árbol de Sucesos correspondiente a la SES.

<b>Escenarios</b>	<b>Frecuencia (a<sup>-1</sup>)</b>
<i>Jet Fire</i>	0,2331
<i>Jet Fire/BLEVE</i>	0,0115
Nube tóxica	1,1082
VCE	0,159

**Fuente:** Elaboración propia.

El escenario de mayor frecuencia es la Nube Tóxica, cuya frecuencia supera el valor unitario anual, resultado que coincide con lo reportado en el Registro de Incidentes

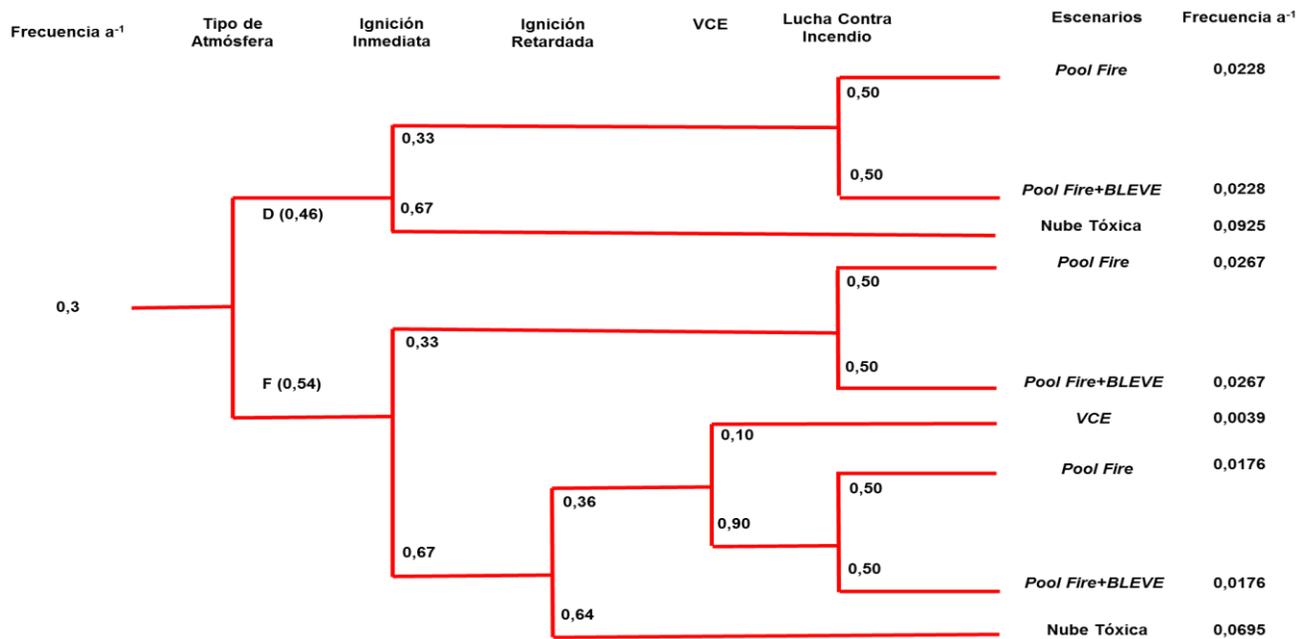
de la PPC donde solo han sucedido escapes de gas. La frecuencia de ocurrencia del resto de los escenarios es notablemente más baja, siendo el mayor el *Jet Fire* cuya frecuencia unitaria se alcanza al cabo de 4,29 años, seguido de la *VCE* con 6,29 años y el *Jet Fire/BLEVE* con 87 años. Esto indica que es muy probable que ocurra un *Jet Fire* y una *VCE* en períodos de tiempo relativamente cortos. El hecho de que estos escenarios no hayan tenido lugar en la PPC no implica motivo de tranquilidad sino la posibilidad real de que pueda ocurrir en cualquier momento con las afectaciones humanas, económicas y ambientales que implica. Afortunadamente el escenario *Jet Fire/BLEVE* posee una frecuencia de ocurrencia mucho menor que la del resto de los escenarios, pues es este el escenario más devastador según Díaz, (2013) en la industria del petróleo y sus derivados.

Atendiendo a los valores referidos en la Tabla 3.2 resultantes del Árbol de Sucesos y teniendo en cuenta la escala establecida por Santos, (2010) mostrada en la Tabla 1.2 puede clasificarse la ocurrencia del suceso *Jet Fire/BLEVE* como probable, mientras los demás escenarios se consideran frecuentes; lo cual indica el alto riesgo que representa una avería en esta área.

Puede destacarse que aquellos escenarios que ocurren en cadenas de sucesos donde no se aísla la SES deben tener áreas peligrosas mucho mayores que en el caso donde se aisle, dado que la fuente de emisión mantendría un comportamiento continuo al mantenerse las balas separadoras en operación continua.

### **3.1.2 Análisis del Árbol de Sucesos para un derrame de nafta en el almacén de nafta de la ECO.**

Se confecciona el Árbol de Sucesos para un derrame de nafta en el almacén de nafta de la ECO como se muestra en la fig. 3.4.



**Fig. 3.4:** Árbol de Sucesos para un derrame de nafta en el almacén de nafta de la ECO.

**Fuente:** Elaboración propia.

Los nodos frecuencia de ocurrencia y tipo de atmósfera del árbol se determinan análogos al árbol del gas natural, mientras el nodo correspondiente a la probabilidad de una ignición inmediata se establece según Sánchez, (2016).

Para establecer las probabilidades del nodo ignición retardada también se sigue el mismo procedimiento que en el árbol anterior, estableciendo como posibles fuentes de ignición las mostradas a continuación.

**Tabla 3.4:** Posibles fuentes de ignición para un derrame de nafta en el almacén de nafta.

<b>Fuente de ignición</b>	<b>Ubicación respecto a la fuente</b>	<b>Dirección del viento</b>	<b>Distancia a la fuente. (m)</b>
<i>Flare</i> de PPC	SSE	NNW	70
<i>Flare</i> de <i>ENERGAS</i>	W	E	250
Calderas	NNE	SSW	300
Taller mecánico	N	S	400
Grupo electrógeno	NNE	SSW	350
Bombas Magistrales	NNE	SSW	50
Turbinas <i>ENERGAS</i>	NNW	SSE	180
Taller eléctrico	NE	SW	600

**Fuente:** Elaboración propia.

En la siguiente tabla se muestran las posibles áreas con potencial de ignición para las estabilidades “D” y “F” en función de las fuentes de ignición.

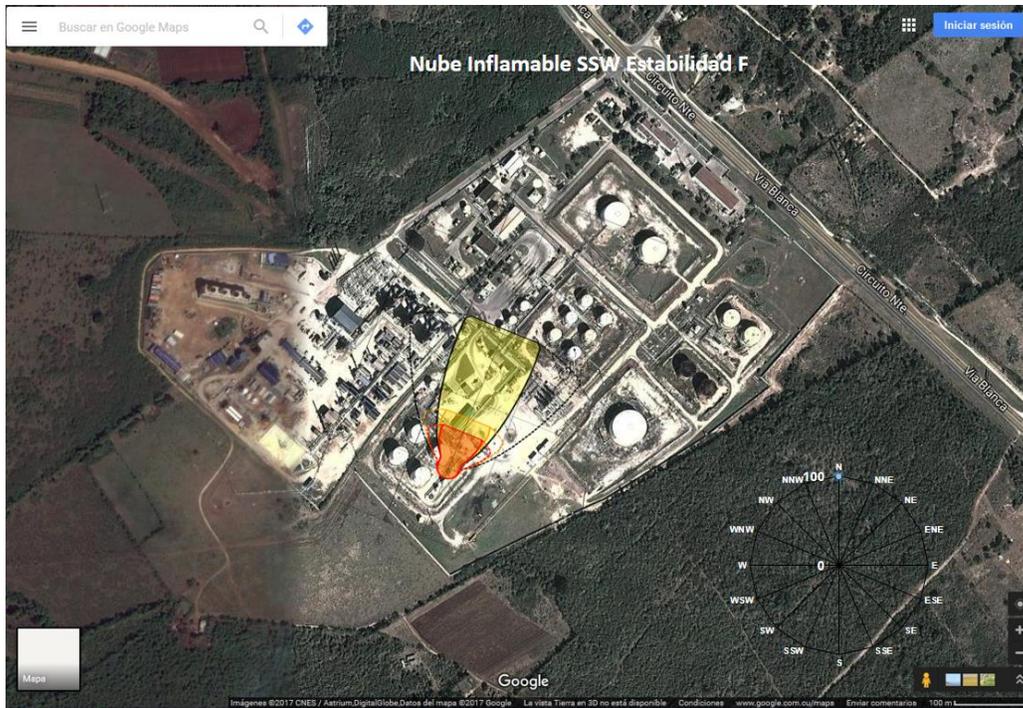
**Tabla 3.5:** Distancias con potencial de ignición ante un derrame de nafta en el almacén de nafta.

Fuente de ignición	Distancia del almacén a la fuente de ignición. (m)	Distancias con potencial de ignición. (m)	
		Estabilidad “D”	Estabilidad “F”
<i>Flare</i> de PPC	70	35	60
<i>Flare</i> de <i>ENERGAS</i>	250	32	54
Calderas	300	45	75
Taller mecánico	400	44	72
Grupo electrógeno	350	45	75
Bombas Magistrales	50	45	<b>75</b>
Turbinas <i>ENERGAS</i>	180	53	86
Taller eléctrico	600	52	83
<b>CALMA</b>		<b>159</b>	

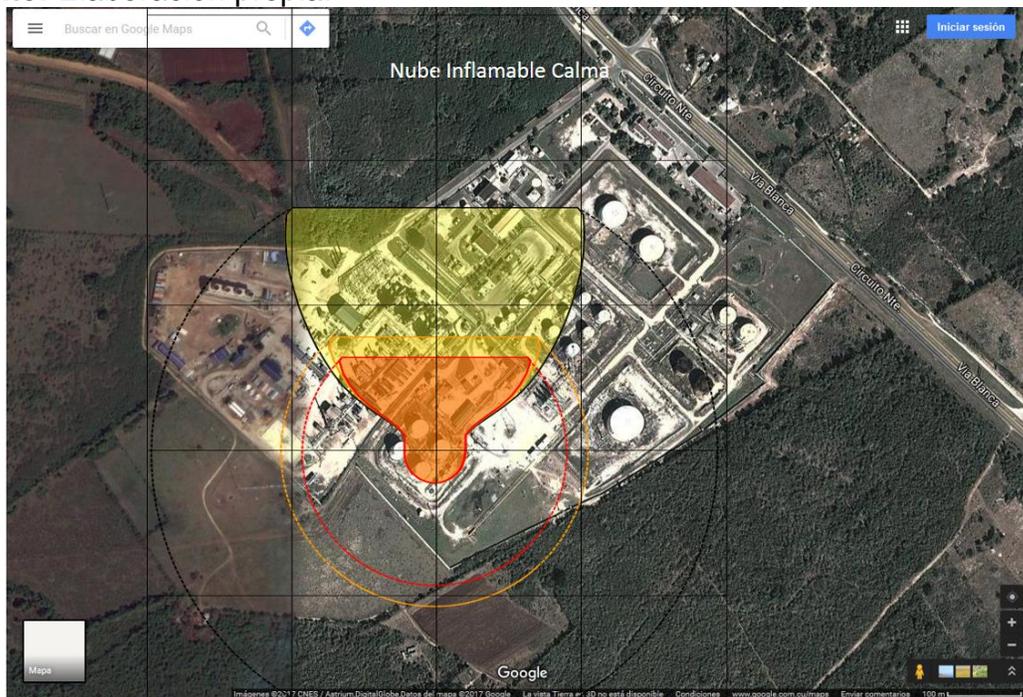
**Fuente:** Elaboración propia.

Como puede observarse en el caso de un derrame de nafta, las “fuentes reales de ignición” están constituidas por las Bombas Magistrales bajo estabilidad “F” y en estado de Calma; además para la Calma también se considera “fuente real de ignición” al *flare* de la PPC.

Las áreas implicadas en la fuente de ignición Bombas Magistrales con estabilidad “F” y en estado de Calma se muestran a continuación en las fig. 3.5 y 3.6 respectivamente.



**Fig. 3.5:** Áreas de atmósferas peligrosas para el escenario nube inflamable con fuente de ignición Bombas Magistrales y estabilidad “F”.  
**Fuente:** Elaboración propia.



**Fig. 3.6:** Áreas de atmósferas peligrosas para el escenario nube inflamable en estado de Calma.  
**Fuente:** Elaboración propia.

De igual forma toda el área comprendida entre la circunferencia naranja definida por sus respectivas líneas de confianza, (línea discontinua naranja), posee condiciones de inflamabilidad si se expone a fuentes de ignición ocasionales para el estado de calma ante variaciones en la dirección del viento.

Cuando se analiza la posibilidad de una ignición retardada en atmósferas tipo “D”, esta no tiene lugar debido a que bajo estas condiciones de atmósfera neutra la nube no alcanza ninguna fuente de ignición, por lo que se desecha la posibilidad.

El valor probabilístico de ocurrencia de una ignición retardada que se establece, corresponde a la sumatoria de los valores de frecuencia de los vientos en la dirección SSW y del estado de Calma, para un valor de 0,36.

En el caso de estudio es necesario analizar además de la posibilidad de una ignición retardada, la posibilidad de *VCE*, pues aun cuando las áreas de atmósferas peligrosas alcanzan una fuente de ignición esto no significa que ocurra la *VCE*, dado que; según Casal *et al.*, (2001) puede ocurrir una llamarada que se repliegue hasta formar un *Pool Fire*.

A las acciones de mitigación como se plantea anteriormente en lo concerniente al árbol del gas natural, le corresponden valores probabilísticos de 0,5 definidos por Wells, (2003).

A continuación, se encuentran tabulados los valores de frecuencia total de ocurrencia de los escenarios de riesgos resultantes del Árbol de Sucesos, cada frecuencia total se determina como la sumatoria de las frecuencias de aquellas cadenas de sucesos que tengan como resultado los mismos escenarios.

**Tabla 3.6:** Frecuencias totales de los escenarios obtenidos del Árbol de Sucesos correspondiente al almacén de nafta.

Escenarios	Frecuencia total (a <sup>-1</sup> )
<i>Pool fire</i>	0,0671
<i>Pool fire/BLEVE</i>	0,0671
Nube tóxica	0,162
VCE	0,0039

**Fuente:** Elaboración propia.

Como puede observarse el escenario más frecuente lo constituye la nube tóxica, al igual que en el gas natural, para este caso la frecuencia unitaria del escenario se verificaría cada 6,17 años, seguido del *Pool Fire* y el *Pool Fire/BLEVE* con períodos probables de aparición de 14,9 años. El escenario de menor frecuencia de ocurrencia será la *VCE* el cual se verificaría cada 256 años.

Es importante señalar el hecho de que las frecuencias probables de ocurrencia de la Nube Tóxica y la *VCE* para el caso de la nafta son menores que para el gas, sin embargo, la frecuencia de ocurrencia de la *BLEVE* es notablemente mayor para la nafta siendo en este caso 5,82 veces mayor.

Las frecuencias en este caso pueden clasificarse como: frecuentes para la nube tóxica, probables para el *Pool Fire* y el *Pool Fire/BLEVE* y ocasional para la *VCE*. Esto reafirma que tanto para la nafta como para el gas natural las probabilidades de ocurrencia de accidentes mayores son particularmente altas y debe constituir motivo de preocupación para todo el personal de la PPC.

Según Wells, (2003) y Sánchez, (2016) las probabilidades de ocurrencia de un suceso iniciador capaz de desencadenar accidentes mayores se encuentran en el orden de  $10^{-4}$ , siendo significativamente mayores las del caso de estudio con valores

de 1,5 y 0,3 lo cual obviamente provoca que la posibilidad de ocurrencia de los distintos escenarios de riesgos sea alta. Por lo tanto; las acciones de todo el personal deben estar encaminadas a minimizar la cantidad de escapes y derrames de gas y nafta respectivamente mediante un estricto control del cumplimiento de los plazos de mantenimiento y la capacitación de operadores y directivos.

### **3.2 Análisis de las áreas de atmósferas peligrosas obtenidas mediante ALOHA.**

En este acápite quedan establecidas las principales consideraciones realizadas para la evaluación mediante el *Software ALOHA* de las áreas de atmósferas peligrosas, así como su análisis correspondiente en cada una de las zonas de la PPC que se estudian.

#### **3.2.1 Consideraciones a tener en cuenta para la evaluación de las áreas de atmósferas peligrosas mediante el *Software ALOHA*.**

Para la evaluación de las áreas de atmósferas peligrosas se establecen varias consideraciones con el propósito de obtener resultados representativos del área estudiada y que a su vez concuerden y complementen los resultados de las técnicas utilizadas en la investigación:

- Se evalúan solo aquellas direcciones del viento donde se puedan encontrar fuentes de ignición y personal de la PPC, tomando como referencia la SES y el almacén de nafta. Estas direcciones son mostradas en las tablas 3.1 y 3.4 para el gas natural y la nafta respectivamente.
- Se evalúan las áreas de atmósferas peligrosas para las diferentes direcciones del viento y sus valores correspondientes de velocidad media para las clases de estabilidad “D” y “F”, definidas previamente en el Árbol de Sucesos, además se evalúa el estado de Calma.

- Se toman los valores medios de las variables ambientales temperatura, humedad relativa y nubosidad registrados en el Registro Climatológico según Moya, (2010).
- El gas natural se evalúa como etano y se determina su comportamiento a partir de la composición cromatográfica del gas según *ENERGAS*, (2017) calculando el carbono e hidrógeno medio. El análisis cromatográfico del gas se muestra en el anexo 1d.
- Para el caso de la SES se establece la fuente del escape en las líneas de recuperación de gases dado que el Registro Histórico muestra que la totalidad de los escapes han sido en el ducto, pudiendo constatarse el mal estado corrosivo de las líneas por lo que se establece en el *Software* como fuente de escape las tuberías.
- Se establece en el *Software* la fuente de escape como fuente continua puesto que, en el Árbol se analiza la posibilidad de aislar o no la SES y se evalúa en *ALOHA* para el peor escenario, el cual tendrá lugar mientras esta no se aisle. Además, es poco probable que se detecte a tiempo el escape dado que actualmente no se cuenta con instrumentación para esto y solo será detectado por el olfato, circunstancia peligrosa y que se dificulta debido a que constantemente se puede percibir el olor característico del H<sub>2</sub>S contenido en el gas, incluso dentro de las oficinas.
- No se evalúa el escenario *BLEVE* en el área de la SES pues *ALOHA* no es capaz de modelar sistemas bifásicos y el contenido de líquido en las balas está determinado por el crudo.
- La *BLEVE* en el almacén de nafta se evalúa en estado de Calma dado que, según Díaz, (2013), éste escenario no depende de las condiciones atmosféricas, sino de las sustancias y las condiciones de almacenamiento.
- La nafta se evalúa como n-hexano según Roth, (2015).
- En el caso de la nafta se establece el escape de la sustancia por rajadura en la base del tanque, en correspondencia de la totalidad de los derrames que se registran en la PPC.

### 3.2.2 Análisis de las áreas de atmósferas peligrosas obtenidas para el escenario Nube Tóxica.

En este acápite se analizan las áreas de atmósferas peligrosas generadas por la Nube Tóxica ante un escape de gas y un derrame de nafta, mostradas en los anexos 4d y 5c para las direcciones del viento que se analizan respectivamente. Se realiza además una breve comparación de las mismas.

Con motivo de obtener un resultado más representativo de las condiciones más adversas bajo las cuales se puede originar la Nube Tóxica, se analizan las condiciones de Calma.

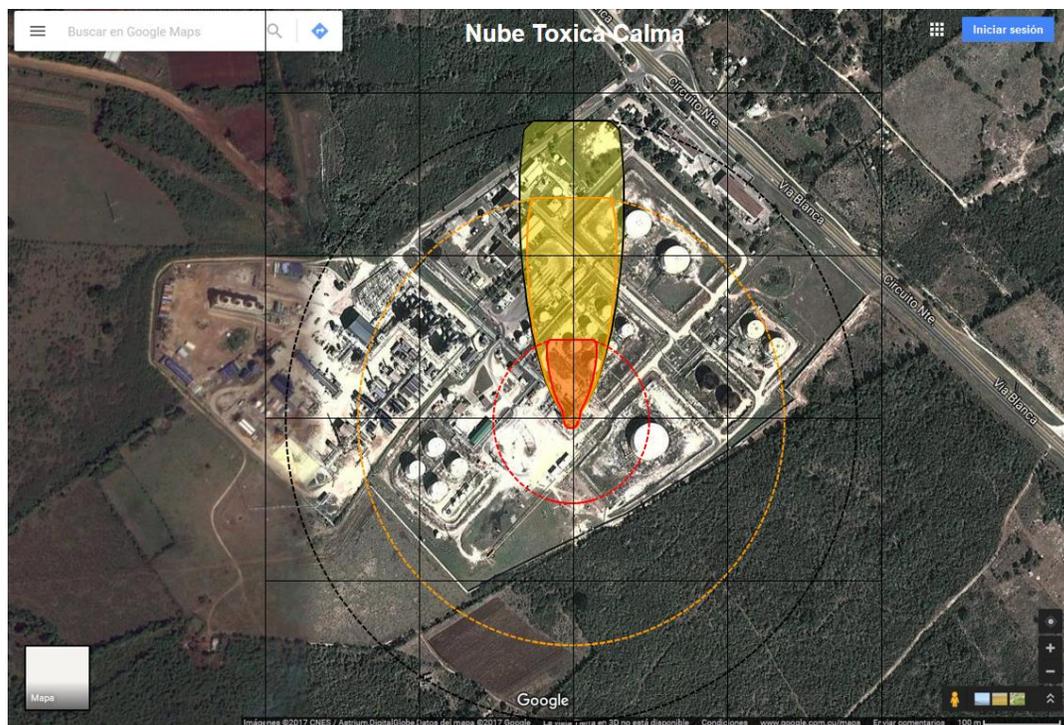
Las dimensiones de las áreas de atmósferas peligrosas generadas por un escape de gas son mostradas en la Tabla 3.7.

**Tabla 3.7:** Dimensiones de las áreas de atmósferas peligrosas para la Nube Tóxica bajo las condiciones de Calma en la SES.

Estado	Velocidad del viento (m/s)	Niveles	Longitud (m)	Ancho (m)
Calma	≤ 1	TEEL- 3	98	90
		TEEL- 2	273	130
		TEEL- 1	367	140

**Fuente:** Elaboración propia.

Un análisis de las dimensiones de las áreas de atmósferas peligrosas y las áreas donde generalmente radica personal, permite establecer que serán afectadas todas las áreas de la PPC excepto las oficinas de la UEB que solo se afectan parcialmente; teniendo en cuenta que la Nube Tóxica en condiciones de Calma se verifica en cualquier dirección respecto a la fuente como se muestra en la fig. 3.7.



**Fig. 3.7:** Áreas de atmósferas peligrosas de la Nube Tóxica en condiciones de Calma en la SES.

**Fuente:** Elaboración propia.

Como se observa en la figura anterior la línea de confianza del área correspondiente al *TEEL- 1* abarca prácticamente toda el área de la PPC, zona donde se considera que los individuos expuestos pueden sufrir efectos moderados sobre su salud y percibir claramente un olor desagradable; sin embargo, el área correspondiente a las afectaciones del *TEEL- 2* abarca todo el espacio operacional de la PPC. El personal presente en áreas con esta concentración puede sufrir efectos irreversibles sobre su salud o síntomas que les impida tomar decisiones para protegerse. El área roja correspondiente al *TEEL- 3* afortunadamente no afecta directamente ningún área donde se encuentren permanentemente operadores, aunque no se descarta la afectación a los mismos o personal de mantenimiento que se encuentren en ella en el momento del escape. De existir presencia de personas estas sufrirán riesgos para su vida.

Las distintas áreas donde radica personal de la PPC con su correspondiente afectación en caso de averías y la cantidad de personal aproximada se muestran en la Tabla 3.8.

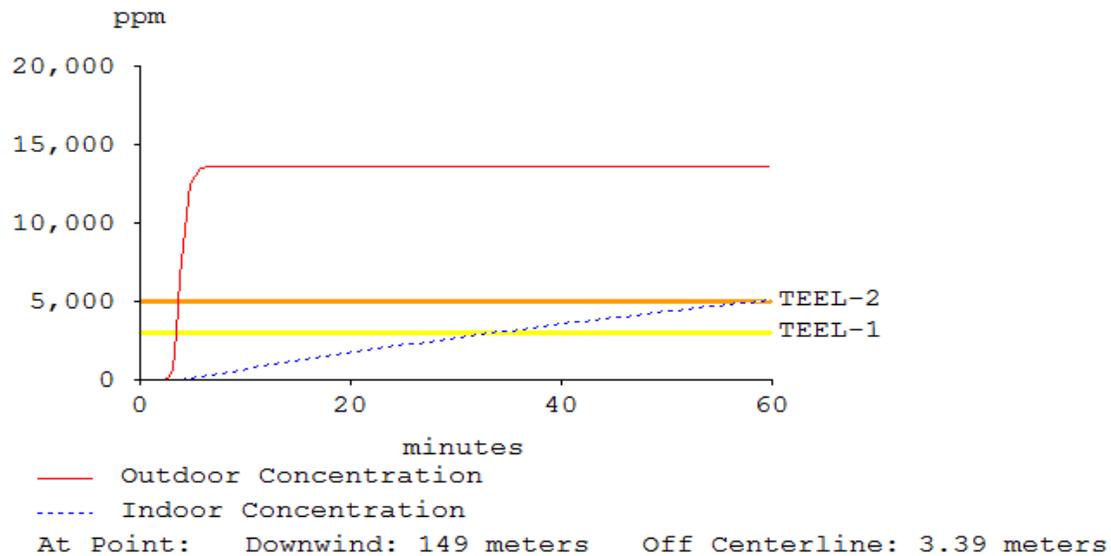
**Tabla 3.8:** Afectaciones de la Nube Tóxica por área de trabajo ante un escape de gas natural.

Área	Afectación	Cantidad de trabajadores
Bombas Magistrales	TEEL- 2	2
Oficina del Jefe de Turno	TEEL-2	6
Cuarto de Control 48	TEEL-2	4
Calderas	TEEL-2	3
Taller mecánico	TEEL-1	8
Grupo Electrónico	TEEL- 1	2
Oficinas de la UEB	TEEL-1 (Parcialmente)	30
Taller eléctrico	TEEL-1	6
Casa de Bombas	TEEL-2	1

**Fuente:** Elaboración propia.

Es necesario señalar que estas afectaciones dependen de la dirección en la cual se verifique la nube en estado de Calma puesto que, todas las áreas no se afectan simultáneamente.

ALOHA también permite predecir el comportamiento de las concentraciones en locales interiores. Se analizan todos los locales con oficinas y se detecta que solo en el caso de la oficina del Jefe de Turno y en el Cuarto de Control 48 existen afectaciones en sus interiores. La fig. 3.8 muestra dicho comportamiento en la Oficina del Jefe de Turno.

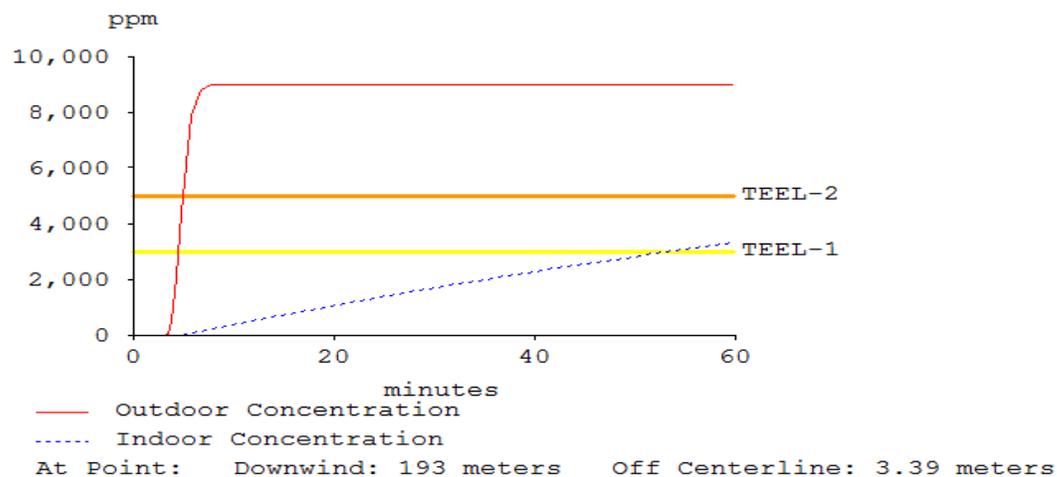


**Fig. 3.8:** Afectaciones en locales interiores correspondiente a la oficina del Jefe de Turno ante una Nube Tóxica de gas natural.

**Fuente:** ALOHA, (2017).

Como puede observarse al cabo de 37 minutos aproximadamente del escape se alcanzan concentraciones superiores al *TEEL-1* dentro de las oficinas, mientras que en el exterior las concentraciones son de *TEEL-2* a partir de los 4 minutos aproximados. Aunque dentro de las oficinas la concentración no ofrece peligro para la salud no existe ya la posibilidad de evacuar las oficinas ni de recibir ayuda del exterior sin medios de protección, pues la concentración fuera de estas impide tomar decisiones de defensa y afecta notablemente la salud; situación que se agrava a los 60 minutos en el cual las concentraciones dentro de las oficinas igualan valores de *TEEL-2*. Por tanto: las oficinas no se consideran lugares seguros.

De forma similar se realiza el análisis para el Cuarto de Control 48 partiendo de lo mostrado por la fig. 3.9.



**Fig. 3.9:** Afectaciones en locales interiores correspondientes al Cuarto de Control 48 ante una Nube Tóxica de gas natural.  
**Fuente:** ALOHA, (2017).

En este caso se obtienen concentraciones comprendidas por el *TEEL- 1* dentro del Cuarto de Control en los 53 minutos aproximados mientras que, a diferencia de la oficina del Jefe de Turno anteriormente analizada, nunca llega a igualar las concentraciones correspondientes al *TEEL- 2*; al menos en el rango de tiempo ofrecido por *ALOHA*, que son los 60 minutos. Para este local se ven afectaciones mucho menos agresivas, pudiéndose percibir fácilmente a través del olfato y las lesiones serán moderadas. En cambio, fuera de este local las concentraciones alcanzan valores relativos al *TEEL- 1* y *TEEL- 2* al cabo de los 4 minutos aproximadamente, y el salto entre una y otra es prácticamente instantáneo por lo que, aquellas personas que se encuentren fuera de este local en áreas relativamente cercanas al Cuarto de Control, sufrirán efectos irreversibles sobre su salud.

Una vez analizadas las áreas de atmósferas peligrosas ante un escape tóxico de gas natural y sus consiguientes efectos nocivos para el personal de operación de la PPC, se analiza a continuación el mismo escenario para un derrame de nafta.

Las dimensiones de las áreas de atmósferas peligrosas generadas por un derrame de nafta son mostradas en la Tabla 3.9.

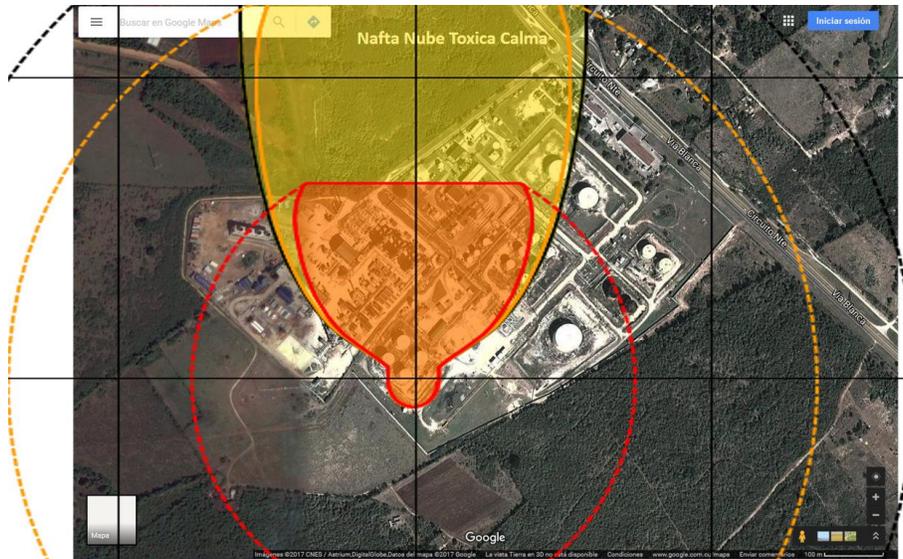
**Tabla 3.9:** Dimensiones de las áreas de atmósferas peligrosas para la Nube Tóxica bajo las condiciones de Calma en cualquier dirección del viento en el almacén de nafta.

Estado	Velocidad del viento (m/s)	Niveles	Longitud (m)	Ancho (m)
Calma	≤ 1	TEEL- 3	330	400
		TEEL- 2	646	500
		TEEL- 1	813	600

**Fuente:** Elaboración propia.

De igual forma que en el caso del gas natural, se determinan las áreas afectadas por la nube, en este caso se afectan con *TEEL- 3* todas las áreas que se estudian excepto el taller mecánico, el grupo electrógeno, el taller eléctrico y las oficinas de la UEB, las cuales se ven inmersas dentro del *TEEL- 2*. Puede observarse en la fig. 3.10.

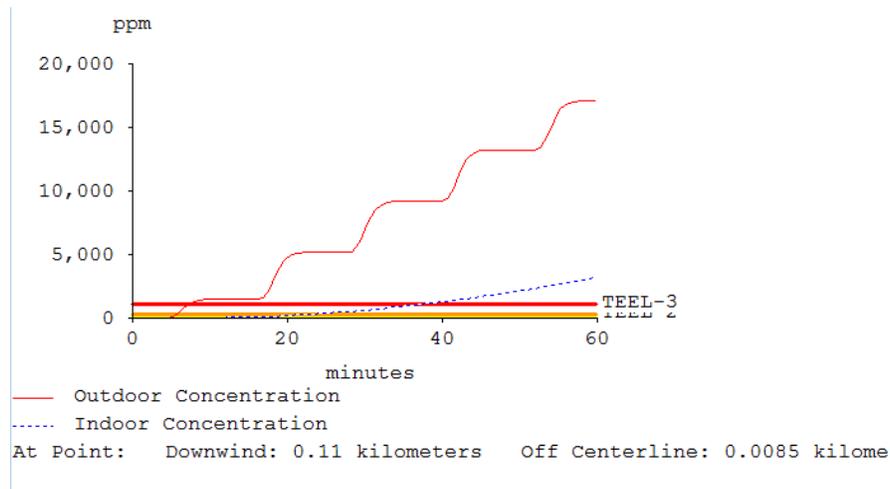
En la fig. 3.10 se aprecia que el área que abarca la nube de nafta es significativamente mayor que la que describe la nube de gas natural mostrada con anterioridad en la fig. 3.7; por lo que, las afectaciones pertinentes son notablemente mayores.



**Fig. 3.10:** Áreas de atmósferas peligrosas de la Nube Tóxica en condiciones de Calma en el almacén de nafta.

**Fuente:** Elaboración propia.

Referido a las afectaciones en locales interiores para este escenario se señala que solo existen afectaciones en la oficina del Jefe de Turno y en el Cuarto de Control 48 como se muestra en las fig. 3.11 y 3.12 respectivamente.



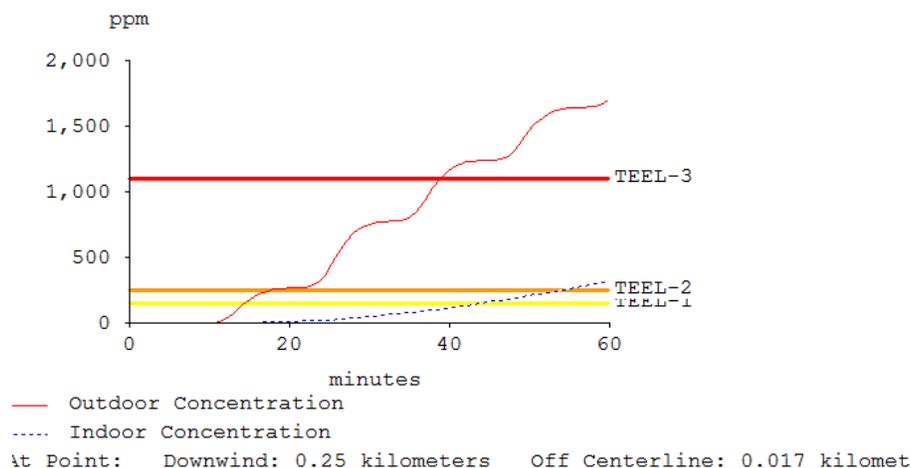
**Fig. 3.11:** Afectaciones en locales interiores correspondiente a la oficina del Jefe de Turno ante una Nube Tóxica de nafta.

**Fuente:** ALOHA, (2017).

Como se observa en la figura anterior, los valores de *TEEL- 1* se alcanzan al instante de iniciar el escape, los comprendidos dentro del *TEEL- 2* se alcanzan sobre los 20 minutos aproximados y los de *TEEL- 3* al cabo de 38 minutos. Esto indica que incluso dentro de las oficinas se alcanzan concentraciones incompatibles para la vida. Sin embargo, a diferencia del caso de la SES, sí puede ser detectado rápidamente el derrame mediante los niveles de los tanques, los cuales cuentan con un sistema automatizado de instrumentación. Esto ofrece cierto margen de reacción ante la ocurrencia de un derrame.

En el caso del Cuarto de Control 48 como se muestra en la siguiente figura los valores de *TEEL- 1* se alcanzan en los primeros 45 minutos aproximadamente, el *TEEL- 2* a los 55 minutos y el *TEEL- 3* nunca llega a alcanzarse en el interior de este local, se alcanza en el exterior del mismo en un período de tiempo de 38 minutos aproximadamente.

En ambos locales y con mayor incidencia en la oficina del Jefe de Turno existe alta afectación para la salud y la vida y se hace más difícil recibir ayuda dado que las concentraciones en el exterior son más altas y las áreas notablemente mayores que en el caso de un escape en SES.



**Fig. 3.12:** Afectaciones en locales interiores correspondientes al Cuarto de Control 48 ante una Nube Tóxica de nafta.

**Fuente:** ALOHA, (2017).

### 3.2.3 Análisis de las áreas de atmósferas peligrosas obtenidas para el escenario VCE.

Entre los escenarios resultantes del Árbol de Sucesos tanto para el gas natural como para la nafta tiene lugar la VCE. Los resultados en las diferentes direcciones del viento que se evalúan se muestran en los anexos 4b y 5b respectivamente. Los resultados obtenidos se encuentran en las tablas 3.10 y 3.11 para el gas natural y para la nafta respectivamente.

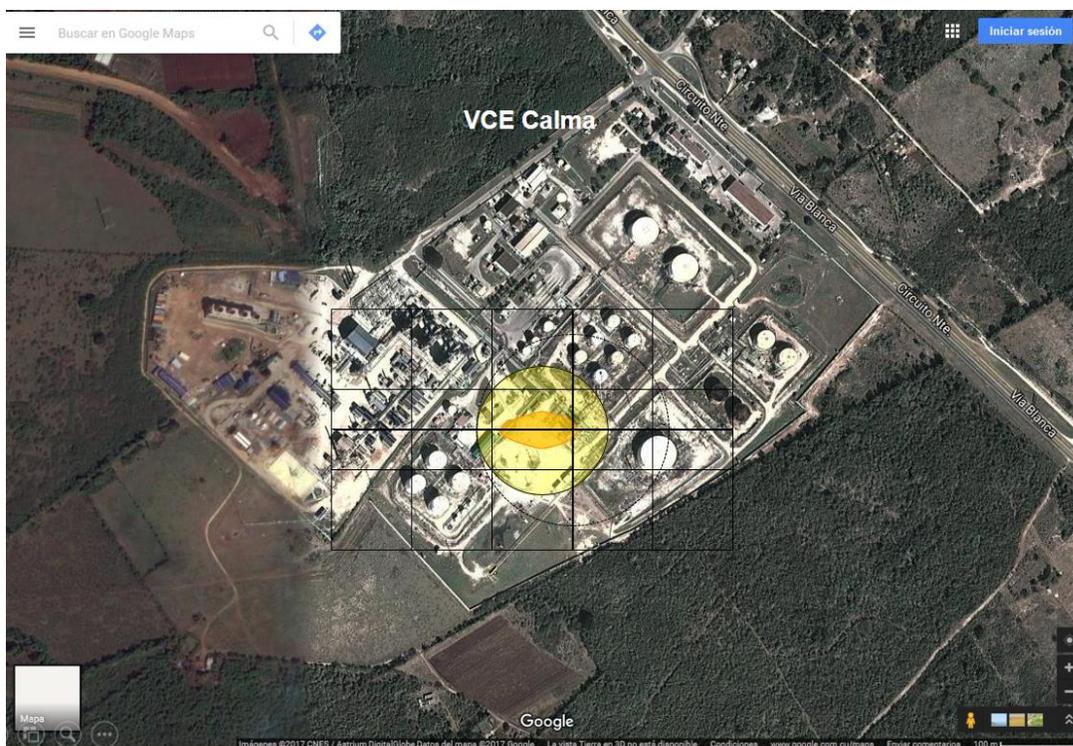
**Tabla 3.10:** Áreas de atmósferas peligrosas del escenario VCE generadas por un escape de gas natural en estado de Calma para cualquier dirección del viento.

Estado	Velocidad del viento (m/s)	Niveles	Longitud (m)	Ancho (m)
Calma	≤ 1	LOC-3	-	-
		LOC-2	90	50
		LOC-1	120	162

**Fuente:** Elaboración propia.

Como puede observarse en la tabla anterior afortunadamente no se alcanzan áreas peligrosas correspondientes a sobrepresiones contenidas dentro del LOC-3, el área concerniente a la zona naranja o valores de LOC-2, abarca 90 metros de largo por 50 metros de ancho y aquel personal que se encuentre contenido en la misma, será propenso a sufrir serios daños. Como se observa en la fig. 3.13 esta área no compromete zonas de acumulación de operadores por lo general, aunque se debe tener en cuenta la posibilidad de presencia de operadores debido a operaciones que se estén realizando casualmente en el área de la SES y de las Bombas Magistrales. Para valores de sobrepresión superiores a los 3,5 psia tiene lugar la manifestación de serios daños, siendo el valor más alto de sobrepresión que se

alcanza de 6,33 psia, lo que evidencia que de suceder este escenario sus consecuencias se verifican en toda su extensión. Los valores de *LOC- 1* o zona amarilla abarcan áreas un poco mayores, estas con valores de 120 metros de largo por 162 de ancho y tampoco involucra zonas donde exista generalmente acumulación de personal ni oficinas, *ALOHA* establece que para valores de sobrepresión iguales a 1 psia, valor contenido dentro de este *LOC* se verifica la destrucción de cristales. El valor de sobrepresión más bajo que se verifica, resultante de la evaluación de este escenario corresponde a los 1,17 psia; por lo tanto, de existir alguna oficina en dicha área tendrá lugar la destrucción de cristales.



**Fig. 3.13:** Áreas de atmósferas peligrosas de la *VCE* en condiciones de Calma en la SES.

**Fuente:** Elaboración propia.

A continuación de similar manera se analiza el escenario *VCE* en el área correspondiente al almacén de nafta. En la siguiente tabla se muestran las áreas de peligro resultantes en su evaluación.

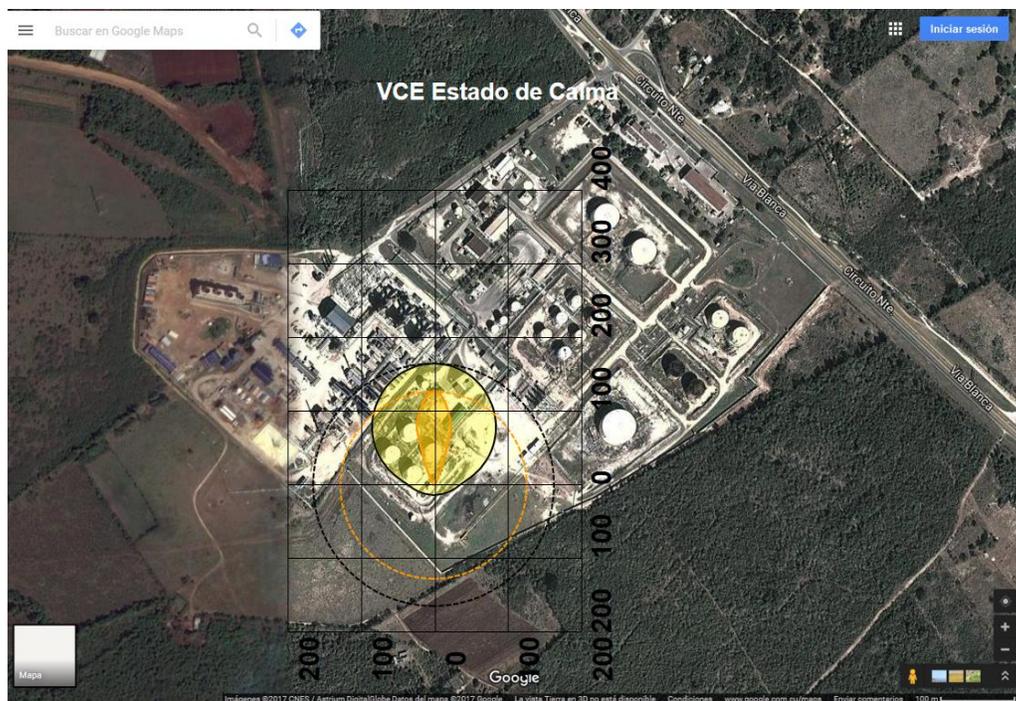
**Tabla 3.11:** Áreas de atmósferas peligrosas del escenario *VCE* generadas por un derrame de nafta en estado de Calma para cualquier dirección del viento.

Estado	Velocidad del viento (m/s)	Niveles	Longitud (m)	Ancho (m)
Calma	≤ 1	LOC- 3	-	-
		LOC-2	128	54
		LOC-1	165	175

**Fuente:** Elaboración propia.

Igual que en el caso del gas natural, para el escenario *VCE*, los valores de *LOC- 3* no ofrecen áreas de peligro, algo muy significativo en caso de existencia de este escenario puesto que, se evaden sus consecuencias.

Las áreas correspondientes a los niveles de *LOC- 2* y *LOC- 1* muestran dimensiones de 128 por 54 y de 165 por 175 metros respectivamente como se refleja en la tabla anterior; esta vez un poco mayores que las áreas mostradas para el gas natural. Como se aprecia en la fig. 3.14 el área comprendida en la zona naranja involucra desde la fuente hasta poco más del perímetro de la oficina del Jefe de Turno, la cual se encuentra ubicada a 110 metros de la fuente. En esa área el máximo valor de sobrepresión que se alcanza son los 6,33 psia y según *ALOHA*, (2007) es un valor suficiente para causar serios daños. También involucra parcialmente al área de las Bombas Magistrales. El espacio ocupado por valores de *LOC- 1* supera el perímetro de la PPC en las direcciones comprendidas entre el N y el W y ocupa parte de la Planta *ENERGAS*, por lo que esta se afecta con los daños inherentes los cuales implican la destrucción de cristales de haber oficinas en esa zona, y a su vez engloba también la oficina del Jefe de Turno y las Bombas Magistrales ahora en su totalidad.



**Fig. 3.14:** Áreas de atmósferas peligrosas de la VCE en condiciones de Calma en el almacén de nafta.

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.2.4 Análisis de las áreas de atmósferas peligrosas generadas por un *Jet Fire* en la SES.

Otro de los escenarios a analizar es el *Jet Fire* que resulta de un escape en la SES. Los resultados que se evalúan se muestran en el anexo 4c y los que se analizan se muestran en la Tabla 3.12 para la dirección del viento ENE y estabilidad “F”, que corresponde con una de las más altas velocidades del viento y para la Calma puesto que, un análisis de los resultados obtenidos para dicho escenario indica que un aumento de la velocidad del viento deviene en un moderado incremento de las áreas de peligro como se muestra a continuación.

**Tabla 3.12:** Áreas de atmósferas peligrosas del escenario *Jet Fire* en estado de Calma para cualquier dirección del viento y en la dirección del viento ENE.

Estado	Velocidad del viento (m/s)	Niveles de radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Longitud (m)	Ancho (m)
Calma	≤ 1	LOC-3	10	20
		LOC-2	17	33
		LOC-1	32	62
ENE	4,69	LOC-3	14	22
		LOC-2	23	38
		LOC-1	35	64

**Fuente:** Elaboración propia.

Como puede observarse, existe un ligero incremento de las áreas de atmósferas peligrosas a mayores velocidades del viento, del orden de los 3 a 6 metros que, aunque parezca insignificante puede marcar la diferencia entre la vida o la muerte.

El área de radiación generada por el *Jet Fire* para la dirección ENE se muestra en la fig. 3.15 que se presenta a continuación.



**Fig. 3.15:** Áreas de atmósferas peligrosas del *Jet Fire* en condiciones de Calma en la SES.

**Fuente:** Elaboración propia.

El área roja correspondiente a radiaciones mayores de 10 kW/m<sup>2</sup> afecta varias balsas separadoras, por lo que no se descarta la posibilidad de ocurrencia de la *BLEVE* y, por consiguiente, un efecto dominó.

### 3.2.5 Análisis de las áreas de atmósferas peligrosas generadas por un *Pool Fire* en el almacén de nafta.

Otro de los escenarios que se analizan, esta vez en el almacén de nafta es el *Pool Fire*, el cual se origina cuando un derrame de nafta tras haberse acumulado en un área es incendiado. Sus resultados se muestran en el anexo 5d. En el caso de estudio; el almacén de nafta compuesto por cuatro tanques se encuentra rodeado de un muro de contención el cual, si bien favorece que la nafta no se esparza hacia otras áreas, facilita la acumulación de líquido en forma de piscina. Otro dato importante es que los tanques de nafta como se explica en el capítulo anterior no poseen sistema autónomo contra incendios, lo cual incrementa la probabilidad de que, un incendio de charco caliente el tanque hasta provocar la *BLEVE*, al no existir respuesta rápida de enfriamiento.

Las áreas de peligro generadas por el *Pool Fire* se muestran en la siguiente tabla, evaluadas en la dirección E del viento y estabilidad “D” por ser las condiciones bajo las cuales se generan las mayores áreas de peligro.

**Tabla 3.13:** Áreas de atmósferas peligrosas del escenario *Pool Fire* en la dirección E del viento y estabilidad “D”.

Dirección del viento	Velocidad del viento (m/s)	Niveles de radiación	Longitud (m)	Ancho (m)
E	4,28	LOC-3	20	28
		LOC-2	26	40
		LOC-1	37	64

**Fuente:** Elaboración propia.

Se conoce que en la PPC los hidrantes para colocar las mangueras del Sistema Contra Incendios (SCI), se encuentran ubicados aproximadamente a 10 metros de los tanques, siendo estos la única fuente de agua para enfriamiento y lucha contra incendios. Como puede apreciarse el área con radiaciones mayores a 10kW/m<sup>2</sup> que representa además alto peligro para la vida, alcanza 20 metros de largo por 28 de ancho, por lo tanto, los hidrantes antes mencionados se encuentran dentro de esta área. Resulta evidente entonces que los operadores de la PPC, los cuales no cuentan con equipos de protección CI, no pueden realizar acciones de mitigación de fuego dado que no pueden acceder a estos hidrantes. Hasta los 26 metros de longitud por 40 metros de ancho no se puede acercarse al área el personal, ya que se sufren probables quemaduras de segundo grado de no poseerse el equipamiento necesario. Conocido lo anteriormente expuesto se espera que, de ocurrir un charco de fuego el riesgo de la formación de la *BLEVE* es prácticamente inevitable.

### 3.2.6 Análisis de las áreas de atmósferas peligrosas generadas por la *BLEVE* en el almacén de nafta.

Dado lo expuesto en el acápite anterior y por ser éste uno de los escenarios probables obtenidos en el Árbol de Sucesos, se evalúa la *BLEVE* obteniéndose los resultados que se muestran a continuación.

**Tabla 3.14:** Áreas de atmósferas peligrosas del escenario *BLEVE*.

Dirección del viento	Velocidad del viento (m/s)	Niveles de radiación	Diámetro (m)
Calma	≤ 1	LOC-3	1208
		LOC-2	1704
		LOC-1	2600

**Fuente:** Elaboración propia.

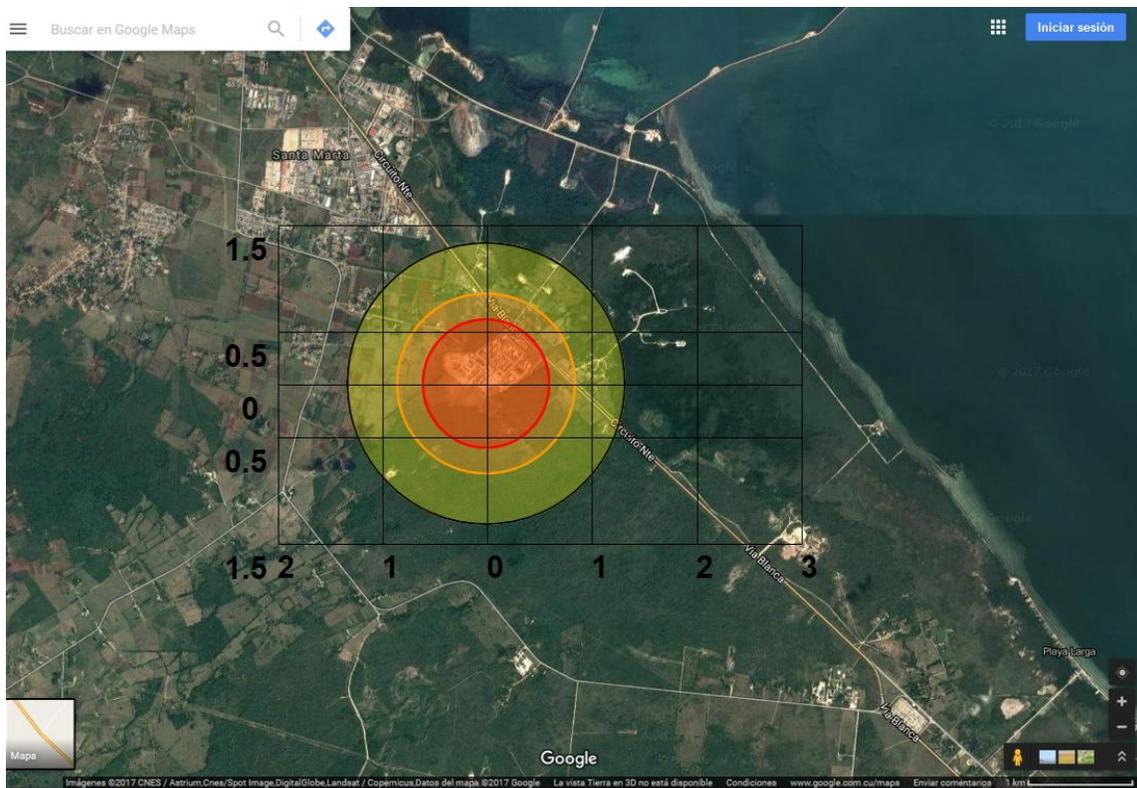
Claramente este escenario, de todos los evaluados es el que genera mayores áreas peligro y del cual se esperan las mayores afectaciones humanas, ambientales y

económicas; siendo el área de peligro para la vida de más de 1 kilómetro de extensión.

En la fig. 3.16 se aprecian fácilmente las áreas afectadas ante un escenario de este tipo.

Obviamente toda la PPC, así como la Planta *ENERGAS*, sufren las mayores afectaciones por estar contenidas completamente en la zona correspondiente a los mayores valores de radiación, siendo estos de hasta  $78,6 \text{ kW/m}^2$  a 150 metros de la fuente, radiación más que suficiente para provocar la muerte.

La zona donde existen quemaduras de segundo grado afecta un asentamiento poblacional que se encuentra ubicado frente a la PPC el cual consta de cinco viviendas multifamiliares, mientras que, la zona donde tienen lugar quemaduras de primer grado afecta la UEB EMPERCAP, ENSERPET y viviendas aledañas que se encuentran en toda esta área. Afortunadamente la radiación no alcanza los poblados de Guásimas y Santa Marta que poseen mayor densidad poblacional.



**Fig. 3.16:** Áreas de atmósferas peligrosas de la *BLEVE* en condiciones de Calma.  
**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.3 Análisis de resultados alcanzados por “*Probit*”.

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

Los efectos de la radiación térmica se evalúan para los escenarios *Jet Fire* en la SES y *Pool Fire* y *BLEVE* en el almacén de nafta.

Para actuar en consecuencia con los resultados analizados de *ALOHA* se consideran a continuación, las mismas direcciones del viento, exceptuando el escenario *BLEVE* dado que, como se explica con anterioridad este escenario no depende de la dirección del viento. Las restantes direcciones del viento evaluadas para estos mismos escenarios se muestran en los anexos 7 y 8.

### 3.3.1.1 Análisis de vulnerabilidad por efecto de la radiación térmica generada por el *Jet Fire*.

**Tabla 3.15:** Porcentaje de afectaciones obtenidos por *Probit* para el escenario *Jet Fire* en la dirección del viento ENE.

Afectación	Dirección del Viento	ENE							
	Distancias (m)	5	10	15	20	25	30	35	40
	Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	18,9	14,1	9,48	5,96	3,95	3,03	2,08	1,49
Muerte por Quemaduras	Índice Probit	6,86	5,86	4,51	2,92	1,52	0,61	-0,67	-1,81
	Porcentaje de Afectaciones	95,58	80,02	31,01	2,24	0,00	0,00	0,00	0,00
Quemaduras de 2do Grado	Índice Probit	8,85	7,68	6,08	4,21	2,55	1,49	-0,03	-1,37
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	85,43	21,29	0,00	0,00	0,00	0,00
Quemadura de 1er Grado	Índice Probit	12,16	10,98	9,38	7,52	5,86	4,79	3,28	1,94
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	100	100	79,97	41,62	4,32	0,00

**Fuente:** Elaboración propia.

Los valores de radiación térmica que aparecen en la tabla anterior son tomados de la propia evaluación del escenario mediante *ALOHA*, a intervalos de 5 metros desde la fuente de emisión. La tabla también muestra, como pueden apreciarse, los tres niveles de afectación y su porcentaje equivalente que permite calcular el método.

Los niveles correspondientes a la muerte por quemaduras y a las quemaduras de segundo grado ofrecen peligro a aquellos individuos que se encuentren contenidos en los 20 primeros metros del origen del escenario, mientras para la afectación referida a las quemaduras de primer grado, son significativas las distancias comprendidas hasta los 35 metros de la fuente. Hasta los 10 metros todos los individuos serán propensos a sufrir quemaduras de primero y/o segundo grados, mientras que hasta los 20 metros todos sufrirán quemaduras de segundo grado.

Dadas las dimensiones de las áreas de peligro y la ubicación del área analizada, en este escenario resulta poco probable que exista acumulación de personal en las zonas de mayor peligro, correspondientes a los 10 metros de la fuente.

**Tabla 3.16:** Porcentaje de afectaciones obtenidos por *Probit* para el escenario *Jet Fire* en estado de Calma.

Afectación	Dirección del Viento	CALMA						
	Distancias (m)	5	10	15	20	25	30	35
	Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	9,41	7,85	5,99	4,17	3,11	2,3	1,69
Muerte por Quemaduras	Índice Probit	4,48	3,86	2,94	1,70	0,70	-0,33	-1,38
	Porcentaje de Afectaciones	30,12	12,47	2,33	0,00	0,00	0,00	0,00
Quemaduras de 2do Grado	Índice Probit	6,05	5,32	4,23	2,77	1,59	0,38	-0,86
	Porcentaje de Afectaciones	84,75	61,93	21,89	1,39	0,00	0,00	0,00
Quemadura de 1er Grado	Índice Probit	9,35	8,62	7,54	6,08	4,90	3,68	2,44
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	100	85,46	45,68	9,10	0,00

**Fuente:** Elaboración propia.

Al analizar los resultados que alcanza la evaluación para el estado de Calma se aprecia que este involucra áreas de peligro hasta 30 metros, ligeramente inferiores al caso anterior. También se observa la disminución de los porcentajes de afectaciones para las mismas distancias.

Los resultados de este escenario para las restantes direcciones y velocidades del viento se muestran en el anexo 7b.

### 3.3.1.2 Análisis de vulnerabilidad por efecto de la radiación térmica generada por el *Pool Fire*.

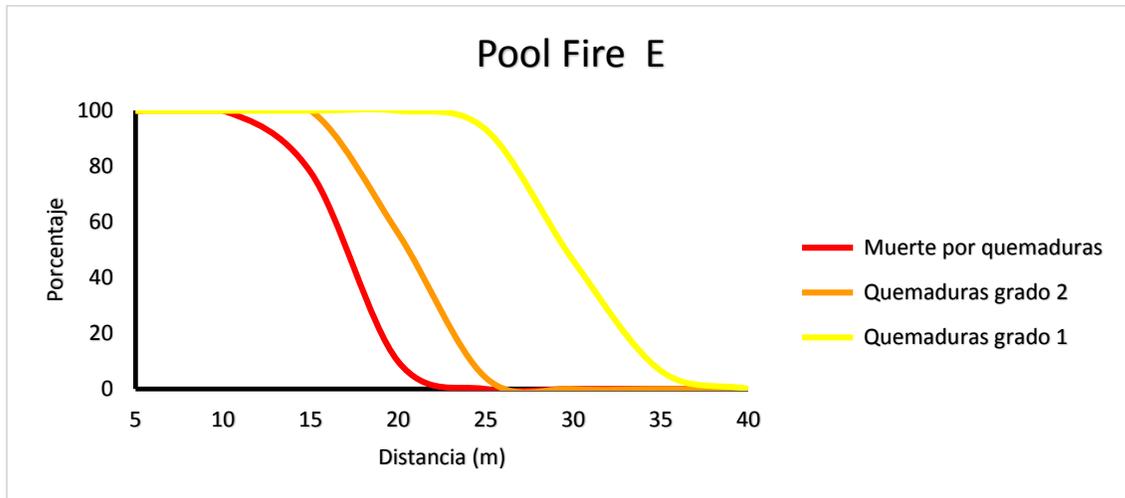
Los resultados de la evaluación para el escenario *Pool Fire* se muestran en el anexo 8b.

**Tabla 3.17:** Porcentaje de afectaciones obtenidos por *Probit* para el escenario *Pool Fire* en la dirección del viento E.

Afectación	Dirección del Viento	E							
	Distancias (m)	5	10	15	20	25	30	35	40
	Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	59	24,6	13,8	7,55	4,7	3,12	2,2	1,66
Muerte por Quemaduras	Índice Probit	10,75	7,76	5,79	3,73	2,11	0,71	-0,48	-1,44
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	77,92	9,89	0,00	0,00	0,00	0,00
Quemaduras de 2do Grado	Índice Probit	13,44	9,92	7,59	5,16	3,25	1,60	0,20	-0,94
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	100	55,95	4,13	0,00	0,00	0,00
Quemadura de 1er Grado	Índice Probit	16,74	13,22	10,90	8,47	6,56	4,91	3,50	2,37
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	100	100	93,27	46,19	6,54	0,00

**Fuente:** Elaboración propia.

Al analizar el presente escenario, se nota que las áreas con afectaciones por quemaduras y/o peligro para la vida son mayores que en el caso del *Jet Fire* por ser significativamente mayores los niveles de radiación alcanzados. En este caso el área con mayor porcentaje de afectación para la vida alcanza los 15 metros mientras que, para las quemaduras de segundo y primer grado se alcanzan porcentajes alarmantes de afectación hasta los 20 y 30 metros respectivamente. Es importante señalar que 30 metros después del origen desaparece la posibilidad de que existan quemaduras letales y de segundo grado, siendo el área fuera de peligro a partir de los 40 metros de la fuente. El siguiente gráfico muestra el perfil de afectaciones para este escenario, donde se aprecia claramente el aumento de las áreas de afectaciones para cada nivel.



**Fig. 3.17:** Perfil de afectaciones por efecto de la radiación para el *Pool Fire*.

**Fuente:** Elaboración propia.

Es importante señalar que las áreas donde se encuentran los operadores con mayor frecuencia (Bombas Magistrales), están fuera del rango de peligro, aunque no se descarta la posibilidad de que los trabajadores estén realizando operaciones en el almacén de nafta. El hecho de que las áreas de peligro se encuentren limitadas por los 35 metros provoca que se dificulte la puesta en marcha de medidas de extinción de fuego desde sus cercanías, como se explicó anteriormente al analizar las áreas generadas por dicho escenario en *ALOHA*.

### 3.3.1.3 Análisis de vulnerabilidad por efecto de la radiación térmica generada por la *BLEVE*.

Al analizar el escenario *BLEVE*, como se observa en la siguiente tabla, sus áreas de peligro aumentan considerablemente en comparación con los escenarios evaluados anteriormente, alcanzando estas los 1200 metros en la dirección radial.

**Tabla 3.18:** Porcentaje de afectaciones obtenidos por *Probit* para el escenario *BLEVE* en estado de Calma.

Afectación	Dirección del Viento	Calma						
	Distancias (m)	200	400	600	800	1000	1200	1400
	Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	58,1	21,2	9,96	5,77	3,6	2,52	1,65
Muerte por Quemaduras	Índice Probit	10,70	7,25	4,68	2,81	1,20	-0,02	-1,46
	Porcentaje de Afectaciones	100	97,56	37,15	1,64	0,00	0,00	0,00
Quemaduras de 2do Grado	Índice Probit	13,37	9,32	6,28	4,08	2,18	0,74	-0,96
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	89,37	17,62	0,00	0,00	0,00
Quemadura de 1er Grado	Índice Probit	16,68	12,62	9,58	7,39	5,49	4,05	2,35
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	100	98,59	68,09	16,90	0,00

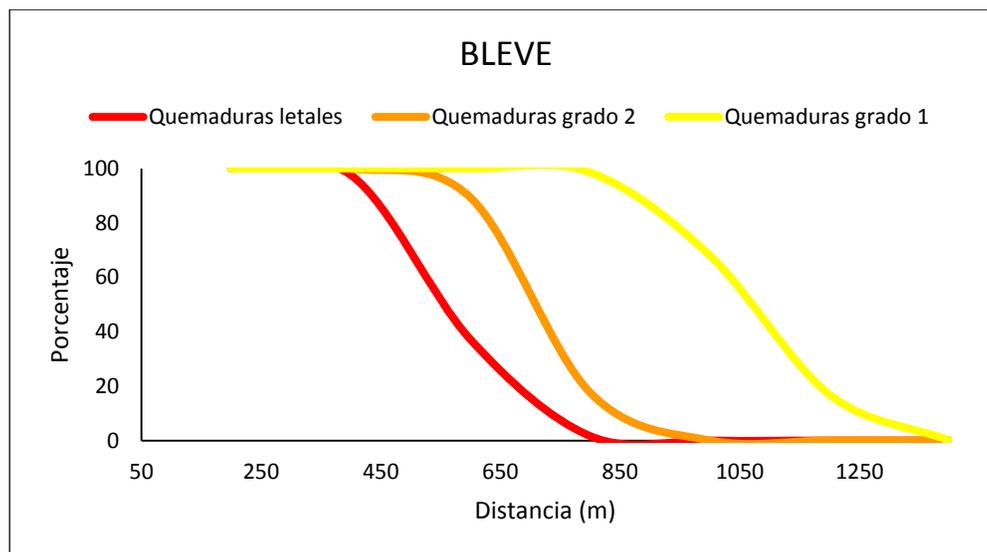
**Fuente:** Elaboración propia.

En este escenario el nivel correspondiente a las muertes por quemaduras muestra valores de importancia en los primeros 600 metros radiales, mientras los niveles de afectaciones por quemaduras de segundo y primer grado se encuentran dentro de los 800 y 1200 metros respectivamente. Expuestos estos valores de distancias afectadas se aprecia lo abarcador de este escenario y por tanto la violencia de sus consecuencias, dato que no resulta novedoso pues en el acápite donde se analizan los resultados de *ALOHA* se explica con exhaustividad lo agresivo de dicho escenario.

De la fuente de origen hasta el Taller Eléctrico y las oficinas de la UEB separan las distancias de 600 y 620 metros respectivamente; siendo estas, de las áreas evaluadas, las que se encuentran a mayor distancia. Esto indica que, absolutamente todas las personas involucradas en las áreas que se analizan además de todos los trabajadores de la Planta *ENERGAS*, quedan expuestos en una u otra medida a padecer quemaduras letales.

El área más crítica para las quemaduras letales está comprendida en los primeros 400 metros donde aproximadamente el 100 % de las personas morirán bajo esta consecuencia, mientras para el caso de las quemaduras de segundo grado la criticidad alcanza los 600 metros. En el caso de las quemaduras de primer grado se extienden hasta valores aproximados de 1 kilómetro.

El siguiente gráfico muestra el perfil de afectaciones para este escenario:



**Fig. 3.18:** Perfil de afectaciones por efecto de la radiación para la *BLEVE*.  
**Fuente:** Elaboración propia.

Aquí se observa claramente lo expuesto con anterioridad respecto a las áreas de afectaciones.

Un recuento de las áreas donde existen oficinas, que es donde se acumula mayor cantidad de personal, arroja los resultados que se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 3.19:** Cantidad de personal afectado por áreas de oficinas por los diferentes niveles de radiación.

Área	Cantidad de personal	Personal afectado					
		quemaduras letales		quemaduras de 2do grado		quemaduras de 1er grado	
		Porcentaje	Afectados	Porcentaje	Afectados	Porcentaje	Afectados
Bombas Magistrales	2	100	2	100	2	100	2
Oficina J' de Turno	6	100	6	100	6	100	6
Cuaro de Control 48	4	100	4	100	4	100	4
Calderas	3	100	3	100	3	100	3
Taller Mecánico	8	98	8	100	8	100	8
Grupos Electrógenos	2	100	2	100	2	100	2
Oficinas de la UEB	30	32	10	86	26	100	30
Taller Eléctrico	6	32	2	86	6	100	6
Casa de Bombas	1	100	1	100	1	100	1
<b>Total</b>	<b>62</b>		<b>38</b>		<b>58</b>		<b>62</b>

**Fuente:** Elaboración propia.

En la tabla anterior, se observa como su nombre lo indica, la cantidad de personas que son afectadas en aquellas áreas donde generalmente existe acumulación de personal. Como se aprecia, la totalidad de trabajadores está integrada por 62 y, aproximadamente 38 de estos morirán a consecuencia de las quemaduras mientras que, 58 son afectados por quemaduras de segundo grado y prácticamente el total de ellos por quemaduras de primer grado.

Cabe señalar que la sumatoria de afectados en estos tres niveles excede las 62 personas, debiéndose esto a que los individuos no precisamente sufrirán un solo nivel de afectación, sino dos e incluso los tres niveles establecidos. Se puede augurar que, ante un escenario de tal envergadura, prácticamente todos los trabajadores de la PPC sufrirán quemaduras de primero y segundo grados.

### 3.3.2 Análisis de vulnerabilidad por efectos de explosión.

Para el análisis de vulnerabilidad por efectos de explosión se toma solamente el escenario *VCE* en las dos áreas de la PPC que se investigan en el presente trabajo. Sus resultados se muestran en los anexos 7a y 8a respectivamente. A continuación, se muestra en la siguiente tabla el porcentaje de afectaciones por sobrepresión en caso de ocurrencia de este suceso en la SES.

**Tabla 3.20:** Porcentaje de afectaciones obtenidos por *Probit* para el escenario *VCE* en estado de Calma en la SES.

Afectación	Dirección del Viento	CALMA								
	Distancias (m)	20	40	60	70	80	90	100	110	
	Sobrepresión (psi)	6,33	6,33	6,33	6,33	5,75	2,58	1,62	1,17	
Rotura de Tímpano	Índice Probit	5,02	5,02	5,02	5,02	4,83	3,29	2,39	1,76	
	Porcentaje de Afectaciones	50,44	50,44	50,44	50,44	43,20	4,39	0,00	0,00	
Muerte por impacto del cuerpo	Índice Probit	5,40	5,40	5,40	5,40	4,93	1,07	-1,17	-2,74	
	Porcentaje de Afectaciones	64,82	64,82	64,82	64,82	47,04	0,00	0,00	0,00	
Lesiones por Impacto del Cuerpo	Índice Probit	8,44	8,44	8,44	8,44	8,02	4,45	2,38	0,93	
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	100	100	100	28,98	0,00	0,00	

**Fuente:** Elaboración propia.

Como se observa, el mayor porcentaje de afectaciones corresponde a las lesiones por impacto del cuerpo con valores porcentuales iguales a 100 hasta los 80 metros de la fuente, disminuyendo después de esta distancia notablemente, de manera que después de los 100 metros desaparece la posibilidad de afectaciones. La rotura del tímpano y muerte por impacto del cuerpo arrojan que aproximadamente la mitad del personal sufrirá de estas afectaciones hasta los 80 metros, período después del cual prácticamente desaparece esta amenaza.

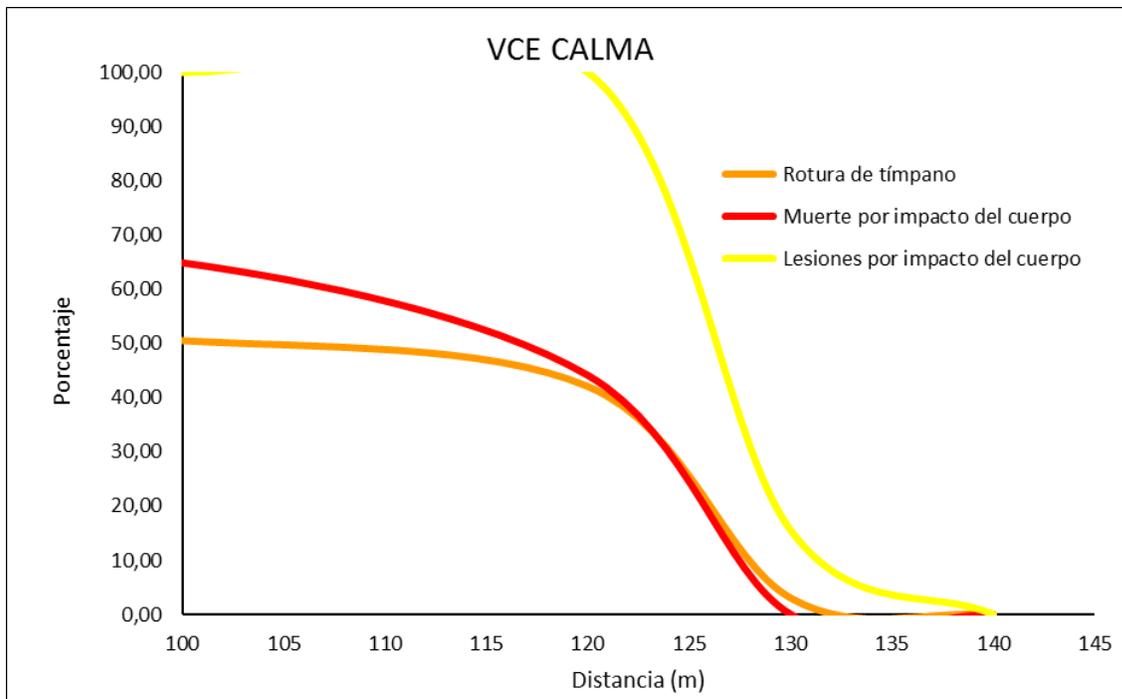
De ocurrir este escenario de riesgo en el almacén de nafta los niveles de afectaciones son similares, aunque el área afectada es mayor como se muestra a continuación:

**Tabla 3.21:** Porcentaje de afectaciones obtenidos por *Probit* para el escenario *VCE* en estado de Calma en el almacén de nafta.

Afectación	Dirección del Viento	CALMA						
	Distancias (m)	40	60	80	100	120	130	140
	Sobrepresión (psi)	6,33	6,33	6,33	6,33	5,66	2,33	1,58
Rotura de Tímpano	Índice Probit	5,02	5,02	5,02	5,02	4,80	3,09	2,34
	Porcentaje de Afectaciones	50,44	50,44	50,44	50,44	42,02	3,11	0,00
Muerte por impacto del cuerpo	Índice Probit	5,40	5,40	5,40	5,40	4,86	0,58	-1,29
	Porcentaje de Afectaciones	64,82	64,82	64,82	64,82	44,07	0,00	0,00
Lesiones por Impacto del Cuerpo	Índice Probit	8,44	8,44	8,44	8,44	7,95	4,00	2,27
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	100	100	100	15,49	0,00

**Fuente:** Elaboración propia.

En este caso las lesiones por impacto del cuerpo alcanzan valores significativos en los primeros 120 metros, área en la cual será afectada la totalidad de las personas. En el caso de la rotura del tímpano y de la muerte por impacto del cuerpo afectarán a la mitad del personal hasta los 120 metros también, ya a los 130 metros las afectaciones deben ser mínimas y después de los 140 metros se considera área libre de peligro como se observa en la siguiente figura.



**Fig. 3.19:** Perfil de afectaciones por efecto de la sobrepresión para la VCE.

**Fuente:** Elaboración propia.

A partir de los 120 metros en lo adelante como se muestra en la tabla 3.21 y en la fig. 3.19 los porcentajes correspondientes a los niveles de rotura del tímpano y muerte por impacto del cuerpo adoptan comportamientos muy similares.

### 3.4 Análisis económico.

Para realizar la valoración económica se evalúa la magnitud de las afectaciones que devienen de la ocurrencia del escenario VCE en las dos áreas que se estudian. El impacto económico de la ocurrencia de este escenario viene dado por las pérdidas por concepto de costos de los equipos implicados, (el costo por el cual fue adquirido el equipo menos lo que ha amortizado el equipo hasta ese momento), las pérdidas económicas de producción y el costo por reposición de estos equipos. En el presente trabajo solo se evalúan los costos por reposición de equipos. Es necesario señalar que se escoge este escenario por contar con los datos reportados por Wells,

(2003), (ver anexo 9) solamente para afectaciones por sobrepresión. A continuación, se muestran las afectaciones para los diferentes equipos en el área de la SES.

En las tablas que se muestran a continuación los valores contenidos dentro de las celdas naranjas y amarillas corresponden a los valores de sobrepresión mostradas por las zonas naranjas y amarillas que brinda ALOHA para el escenario que se analiza respectivamente.

**Tabla 3.22:** Efectos de la sobrepresión de la VCE ocurrida en la SES.

Equipos por área	Sobrepresión (psia)	Afectación
Oficinas de SES	1.12	Demolición parcial.
4 bombas de nafta	1.15	
3 bombas de residuales	1.26	40% de daños estructurales.
3 bombas de Tanque 6	1.49	
9 Bombas Magistrales	1.67	
Comedor	1.8	
1 compresor de aire	1.98	
2 contenedores de la brigada CDC	2.84	Colapso parcial de paredes y techos.
5 intercambiadores de calor	4.93	80% de daños estructurales. Estructuras de acero torcidas y empujadas fuera de sus lugares.
2 separadores de arrastre	5.4	Destrucción total .
4 separadores horizontales (balas)	6.33	

**Fuente:** Elaboración propia.

La localización de los equipos anteriores por áreas se encuentra en el anexo 11.

Las afectaciones sobre los equipos del área, se determinan según lo reportado por Wells, (2003), y tienen un nivel que implica la reposición de la totalidad de los mismos. Esta reposición se traduce en un gasto de \$ 5 272 370.67 de acuerdo con los resultados ofrecidos por el *Software CAPCOST*. Este valor no incluye los costos de reposición para las oficinas de la SES ni de los Contenedores de la Brigada CDC.

Análogamente, se determinan los costos de reposición para los equipos involucrados en el área correspondiente al almacén de nafta, y los resultados se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 3.23:** Efectos de la sobrepresión de la VCE ocurrida en el almacén de nafta.

Equipos por área	Sobrepresión (psia)	Afectación
Tanque 103 y 104	1.26	40% de daños en estructuras de los equipos
4 bombas de nafta	1.37	
4 bombas de agua Cl	1.89	
1 tanque de agua Cl		
2 compresores de aire	2.21	Colapso parcial de paredes y techos.
9 Bombas Magistrales	3.5	Ruptura de tanques de almacenamiento de combustibles. 80% de daños estructurales.
Tanque 102		
4 tanques de nafta	6.33	Destrucción completa de las estructuras.
Tanque 101		
3 intercambiadores de calor		
Oficina del Jefe de Turno		

**Fuente:** Elaboración propia.

La localización de los equipos anteriores por área se encuentra en el anexo 12.

Nuevamente respetando el criterio de Wells, (2003) se determinan para esta área las afectaciones pertinentes a los valores de sobrepresión, y se concluye que el costo por reposición propone un valor de \$ 100 039 312.

### 3.5 Conclusiones parciales.

1. La probabilidad de ocurrencia de un suceso iniciador es mayor en el caso de la SES que en el almacén de nafta.
2. El escenario de riesgo más probable tanto para la SES como para el almacén de nafta es la nube tóxica con frecuencias de 1,1082 y 0,1620  $a^{-1}$  respectivamente.
3. El escenario de riesgo menos probable para la SES es el *Jet Fire/BLEVE* cuya frecuencia es de 0,0115  $a^{-1}$ , mientras que para el almacén de nafta es la *VCE* con un valor de 0,0039  $a^{-1}$ .
4. Las mayores áreas de peligro ocurren generalmente en estado de Calma.
5. 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.
6. La Nube Tóxica es el segundo escenario de mayor magnitud, y en el caso del almacén de nafta, afecta en una u otra medida todas las áreas de la PPC.
7. Los locales interiores no se declaran seguros ante la ocurrencia de una Nube Tóxica por las concentraciones alcanzadas por ella.
8. De todos los escenarios analizados por *Probit* las mayores afectaciones son las que desencadena la *BLEVE* en el almacén de nafta.

## Conclusiones

1. Mediante la combinación de las técnicas Análisis Histórico de Accidentes, Árbol de Sucesos, *ALOHA* y *Probit*, fue posible determinar y evaluar los escenarios de riesgos que pueden tener lugar en la SES y en el almacén de nafta.
2. La combinación de las técnicas Análisis Histórico de Accidentes y Árbol de Sucesos resulta adecuada, ya que permite determinar con precisión los posibles escenarios de riesgos que pueden ocurrir en la PPC y sus frecuencias de ocurrencia.
3. 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.
4. Los escenarios de riesgos que pueden manifestarse en el área de la SES son: la Nube Tóxica, la *VCE*, el *Jet Fire* y el *Jet Fire/BLEVE* con valores de frecuencia que oscilan desde 1,1082 hasta 0,0115 a<sup>-1</sup>.
5. Los escenarios de riesgos que pueden manifestarse en el área del almacén de nafta son: la Nube Tóxica, el *Pool Fire*, el *Pool Fire/BLEVE*, la *BLEVE* y la *VCE* con valores comprendidos entre 0,1620 y 0,0039 a<sup>-1</sup>.
6. Las mayores áreas de peligro son las generadas por la *BLEVE* en el almacén de nafta con una extensión de 2600 metros de diámetro.
7. Los escenarios Nube Tóxica, *VCE*, *Pool Fire* y *Jet Fire* afectan principalmente las áreas de la PPC dejando fuera de peligro las zonas aledañas.
8. Aunque para los escenarios *VCE*, *Pool Fire* y *Jet Fire* las afectaciones humanas son relativamente pequeñas, en el caso de la Nube Tóxica y la *BLEVE* se verá afectada la totalidad del personal de la PPC.
9. Las afectaciones económicas por reposición de equipos, para el escenario analizado, ascienden a \$ 5 272 370.67 y \$ 100 039 312 en las áreas que se estudian.

## **Recomendaciones.**

1. Capacitar a todo el personal de la PPC sobre la base de los resultados obtenidos en la presente investigación.
2. Implementar un Sistema de Alarma para la detección de escapes de gas natural en la SES y un Sistema de Alarma de Incendio en toda la PPC.
3. Mantener los analizadores de gases personales en buen estado técnico y exigir el uso de los mismos.
4. Colocar el *flare* a una distancia tal que no constituya una fuente de ignición ante un derrame en el almacén de nafta.
5. Establecer un Sistema de Extinción de Fuego automático en la ECO.
6. Colocar los hidrantes del almacén de nafta a una distancia que no esté afectada por los valores de radiación pertinentes.
7. Poseer en la PPC medios de protección CI, así como suficientes equipos de respiración autónoma y trajes de protección CI.
8. Realizar simulacros como entrenamiento de extinción de fuego.

## Bibliografía.

1. Bartenev A.M., Gelfand B.E. 2000. Spontaneous initiation of detonations. Progress in Energy and Combustion Science. Disponible: [www.elsevier.com/locate/pecs](http://www.elsevier.com/locate/pecs).
2. Bestratén M., Turmo E. 1999. "Explosiones BLEVE (1): evaluación de la radiación térmica". Instituto Nacional de Seguridad e Higiene del Trabajo. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España.
3. Bestratén, M; (1996). Análisis de riesgos mediante el árbol de suceso. INSHT. Barcelona.
4. Bogomolov, A. I. Química del petróleo y el gas. Editorial Mir. Moscú. 1984.
5. Botta. N.A. 2012. Medición de explosividad. Red Proteger.
6. Carol, Sergio. (2001). Tesis de Doctorado. Una nueva metodología para la predicción de la gravedad de los accidentes industriales. Departamento de ingeniería química, Escuela técnica superior de ingenieros industriales de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. España.
7. Carrillo G., Guerrero P. 2013. "Cálculo de propiedades del gas natural". Trabajo especial de grado en opción al título de Ingeniero Químico. Maracaibo.
8. Casal, J *et al*, 1999. "Análisis del riesgo en instalaciones industriales". Edicions UPC.
9. Castro D., Orozco J., Curiel L. 2013. Monografía. Evaluación de atmósferas peligrosas en la zona industrial de Matanzas ante posibles accidentes químicos. Universidad de Matanzas. Cuba.
10. Department of Civil and Environmental Engineering (2015). Risk Analysis for Engineering. University of Maryland. College Park. USA
11. Díaz A. 2013. Análisis y evaluación de riesgos en la planta de gas de la Empresa Comercializadora de Combustibles de Matanzas. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico. Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos.

12. Dirección General de Protección Civil y Emergencias. 2016. Métodos cualitativos. España.
13. Domínguez J.R. 2014. Análisis cuantitativo de riesgos en el ámbito de la protección civil: aplicación a una instalación de almacenamiento de productos químicos. Trabajo de fin de grado. Universidad de Sevilla. España.
14. Eisenberg 1975.
15. ENFORM. 2016. Curso de sulfuro de hidrógeno. 7<sup>ma</sup> Edición. Versión 7.4. disponible en: PPC.
16. EPA. 2016. ALOHA Software. Disponible en : [www.epa.gov/cameoaloha-software](http://www.epa.gov/cameoaloha-software).
17. EPA. U.S. Environmental Protection Agency. 2016. Obtención de modelos de dispersión. Disponible en: [www.epa.gov/ttn/scram](http://www.epa.gov/ttn/scram).
18. EPEP-Centro. 2017. Registro de Incidentes de la Planta de Procesamiento de Crudo. Cupet.
19. Fernández P.M 2008. Modelos de cálculos de efectos y análisis de consecuencias. Gestión medioambiental y técnicas afines. EOI.
20. Fernández-Cámara. 1990.
21. Ferrero. 2006. “Incendios de hidrocarburos: Estudio de la formación y evolución del boil over de capa fina.” Tesis doctoral. Universidad politécnica de Cataluña.
22. Fuentes E. 2010. “Descripción de las características y propiedades del gas natural”. Universidad de Oriente, Maturín, Venezuela.
23. Gabarrel X. 2008. Evaluación y prevención de riesgos industriales en Centroamérica. Documenta Universitaria Girona. España.
24. García-Roca, C. Lopez-Beitía, C. Vílchez, J.A. Casal, J. 1993. Informatic management of Hazardous substances: legislation, properties and data base. Barcelona.
25. Garo. J.P., Vantelon, J.P. 1999. Thin layer boilover of pure of multicomponent fuels. Proceedings of ARW on transfer to civil applications of military experiences on prevention of Hazardous fires and explosions.

26. GREENSPEACE. 2016. Gas natural. Briefing. Disponible en: [www.greenspeace.org](http://www.greenspeace.org).
27. Juárez M.A. 2014. La metodología HAZOP aplicada al análisis de riesgos. Tesis en opción al título de Ingeniero en Petróleo. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.
28. López D.C. 2006. Análisis de riesgo tecnológico de la unidad de destilación de crudo U-200 asociado a los eventos amenazantes en la torre atmosférica T-201 de la gerencia del complejo Barrancabermeja-ECOPETROL S.A. Especialización en Ingeniería Ambiental. Bucaramanga.
29. Mapas de google maps. 2017.
30. Martínez J.J. 2016. Identificación, análisis y administración de riesgos. Soluciones Proactivas.
31. Medina E. 2003. Modelos de elección discreta. Disponible en: [www.eva.medinaam.es](http://www.eva.medinaam.es).
32. Michaelis, O., Mavrothalassitis, G., Hodin, A. 1995. Boilover rapport interne.
33. Montiel. 1987.
34. Moya, 2010. Registro Cimatológico de la provincial de Matanzas
35. Mudan, K.S.1984. Thermal radiation hazard from hydrocarbon pool fires.
36. NASA 2002. Fault Tree Analysis: Concepts and Applications.
37. NASA 2002. Fault Tree Handbook with Aerospace Applications. Versión 1.1.
38. NFPA 2008. "Flammable and Combustible Liquid Code". Norma 30.
39. NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. U.S. Environmental Protection Agency. ALOHA Examples Scenarios. 2016.
40. Nolan, Dennis P. (2011). *Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for Oil, Gas, Chemical and Related Facilities. Second edition. Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier. The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford OX5 1GB, UK.*
41. NSW. New South Wales. 2011. HAZOP Guidelines. Hazardous Industry Planning Advisory. Disponible en: [www.planning.nsw.gov.au](http://www.planning.nsw.gov.au).
42. Oilfield Review. 2015. Yacimientos de petróleo pesado. Disponible en: Oilproduction.net.

43. Orozco J. 2015. Guía para la caracterización de las sustancias. Disponible en: Dpto. Química e Ingeniería Química. Facultad de Ciencias Técnicas. Universidad de matanzas Camilo Cienfuegos.
44. PETROBRAS. 2010. Hoja de datos de seguridad. HDS.
45. Piedra J. y Valdivieso J. 2013. Evaluación del riesgo de incendio y explosión en una línea de extrusión de polietileno expandido. Tesis de Maestría en Sistema Integrador de Gestión de la Calidad, Ambiente y Seguridad. Universidad Politécnica Salesiana. Ecuador.
46. Planas-Cuchi, E. 1996. Contribución al estudio de la protección contra incendio en instalaciones de proceso. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.
47. Planas-Cuchi, E., Montiel, H., Casal, J. 1997. A survey of de origin, type and consequences of fire accidentes in process plants in the transportations of Hazardous materials. Universidad Politécnica de Cataluña.
48. Ramírez. 2016. Reglamento Tecnológico actualizado de la Planta de Procesamiento de Crudo. Disponible en: PPC.
49. Rausand M. 2015. HAZOP. Hazard and operability study. Department of Production and Quality Engineering Norwegian. University of Science and Tecnology.
50. Rodríguez D., Quintero A., González Y., Cuesta O., Sánchez A. 2014. Variación de la estabilidad y altura de la capa de mezcla en la ciudad de Pinar del Río: su relación con condiciones sinópticas. Revista Brasileira de Meteorología.
51. ROTH 2015. Ficha de datos de seguridad de la nafta.
52. Ruano R. 2013. Ingeniería Energética General. Disponible en: [www.energianow.com](http://www.energianow.com).
53. Sánchez M. 2016. Análisis de riesgos industriales en plantas químicas y petroleras. Método HAZOP. XVI Edición. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial. Universidad de Castilla-La Mancha.
54. Santos G.C. 2010. "Análisis del riesgo individual: Explosión de un ducto de gas natural". Tesis presentada en opción al título de Maestro en Ciencias en

- Ingeniería de Sistemas. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Unidad Profesional Zacatenco "Adolfo López Mateos". México.
55. Schlumberger. 2015. Heavy Oil Exploitation and fluid Characterization. Disponible en: PPC.
56. Spicer and Havens. 2002. The DEGADIS Model. Environmental Software and Services. Disponible en:  
[www.ess.co.at/HITERM/MODELS/degadis.html](http://www.ess.co.at/HITERM/MODELS/degadis.html).
57. Torok Zoltan. 2010. Quantitative and Qualitative Risk Analysis in the Chemical Industry. Faculty of Engineering Environmental Sciences and Babes Bol Yai University. Cluj-Napoca.
58. U. S. Oil and Refining Co. Material Safety. Data Sheet. 2009.
59. Vanderwert, C.A, Brewster, Mc. Ewen, V. Curso práctico de química Orgánica. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de La Habana. 1981.
60. Viatela I. 2007. Análisis comparativo de diferentes modelos para los coeficientes de dispersión atmosférica y su efecto en el cálculo de dosis. Caso de aplicación: reactor experimental RA-6. Universidad Nacional de Cuyo. San Carlos de Bariloche. Argentina.
61. Vílchez J.A. Sevilla, S. Montiel, H. Casal, J. 1995. Historical Analysis of Accidents in Chemical Plants and in the Transportations of Hazardous Materials.
62. Wells, Geoff. (2003). *Majors Hazards and their management*. Gulf Publishing Company. Houston, Texas

## Anexos

### Anexo 1: Caracterización de las sustancias que se analizan.

#### Anexo 1a: Caracterización del Gas Natural del Petróleo.

Según la *NFPA*, (2015) y Santos, (2015) la caracterización para el gas natural del petróleo GNP se establece de la siguiente forma:

Nombre del producto: Gas Natural del Petróleo (GNP).

Nombre Químico: Metano.

Formula Química: Mezcla ( $\text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_6 + \text{C}_3\text{H}_8$ ).

Etiquetado de peligro: HR3, R31, R36, R42, R58, S16, S23, S33. Ver **anexo 1c**.

#### ➤ **Datos físicos**

Apariencia: Incoloro, insípido y con ligero olor a huevo podrido debido a la presencia de mercaptanos.

Punto de ebullición:  $-160^\circ\text{C}$

Punto de fusión:  $-182^\circ\text{C}$

Solubilidad: ligeramente soluble de 0,1 a 10%

Densidad del líquido:  $0,54 \text{ g/cm}^3$

Densidad de vapores:  $0,61 \text{ g/cm}^3$  es más ligero que el aire

T L V -límite superior de inflamabilidad: 14,5%

IPVS - Límite inferior de explosividad: 4,5%

Temperatura de auto ignición: 650<sup>0</sup>C

Coeficiente de expansión: 1 litro de líquido se convierte en 600 litros de agua

Temperatura de inflamación: -222<sup>0</sup>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:

- Fuga en espacios abiertos: Bloquear las válvulas que alimentan la fuga.
- Fuga en espacios cerrados: eliminar precavidamente fuentes de ignición y prevenir venteos para expulsar las probables fugas que pueden quedar atrapadas.

Existencia del producto de control y mitigación en la entidad: 10 extintores PQS, extintores de espuma, agua.

➤ **Peligros para la salud**

Concentración permisible: No se expone

Exposición permisible: No se expone

Partes del cuerpo que afecta: No se expone

Forma de entrada al organismo: vías respiratorias.

Es un asfixiante simple que no tiene propiedades peligrosas inherentes, ni presenta efectos tóxicos específicos, pero actúa como excluyente del oxígeno para los

pulmones. Su efecto es proporcional al grado en que disminuye el oxígeno en el aire que se respira. En altas concentraciones pueden producir asfixia.

➤ **Toxicidad**

Sustancia	Toxicidad							
	Toxicidad aguda	Irritación	Sensibilización	T. por dosis repetida	Mutagenicidad	Carcinogenicidad	Corrosión	T. para la reproducción
		P,O		x			x	

➤ **Datos de reactividad.**

Reacción principal y reacciones secundarias: Reacciona violentamente con pentafluoruro de bromo, trifluoruro de cloro, cloro, flúor, heptafluoruro de yodo, tetrafluoroborato de dioxigenil y oxígeno líquido.

Cinética de reacción: no se expone

Contaminantes producidos: monóxido de carbono.

Reacciones de descomposición: Su descomposición por combustión provoca dióxido de carbono y monóxido de carbono.

➤ **Condiciones de almacenamiento y manipulación.**

Capacidad del recipiente de almacenamiento: Separadores horizontales. 100 m<sup>3</sup>.

Forma del recipiente: Cilíndrico con cabezales semiesféricos. Horizontales.

Dimensiones del recipiente: L. 10m, A, 3,57m

Material de construcción: Acero al 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: Accesorios en la cabeza principal de cada separador (Válvulas para líquidos, para gas del mismo tipo, chequeo, válvula de exceso de flujo, drenaje con válvula de globo).

Instrumentos en la cabeza principal de cada bala: (Manómetro, indicador del nivel del líquido)

Fecha de fabricación del recipiente: 1985 en la URSS.

Condiciones de almacenamiento de la sustancia: Temperatura  $\leq 90^{\circ}\text{C}$ . Presión hasta 2 atm.

Tipo de averías producidas: escapes, derrame de petróleo por sobrellenado. Averías en línea de recuperación de gas.

Características de los alrededores del recipiente: tanques expuestos a condiciones ambientales

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

Uso en el proceso: Recibe el crudo precalentado de los intercambiadores de calor en espiral de la SES.

Fallos ocurridos en estos equipos al operar con estas sustancias: escapes, derrame de petróleo por sobrellenado. Averías en línea de recuperación de gas.

Material de construcción de los equipos donde es usada: acero al carbono.

### **Anexo 1b: Caracterización de la nafta ligera tipo B.**

Según *ROTH*, (2015) la caracterización para la nafta ligera tipo B se establece de la siguiente forma:

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 1c**.

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 69°C.

Punto de fusión: -95°C.

Solubilidad: hidrosoluble 0,01 g/l a 20°C.

Densidad del líquido: 0,67 g/cm<sup>3</sup> a 20°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: 270°C.

Coeficiente de expansión: no se expone.

Temperatura de inflamación: -27°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>.

➤ **Peligros para la salud**

Concentración permisible:

Exposición permisible:

Partes del cuerpo que afecta:

Forma de entrada al organismo:

➤ **Toxicidad**

Sustancia	Toxicidad							
	Toxicidad aguda	Irritación	Sensibilización	T. por dosis repetida	Mutagenicidad	Carcinogenicidad	Corrosión	T. para la reproducción
	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: H. 7m.

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: 1989 en la URSS.

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.

**Anexo 1c: Clasificación y simbología para las sustancias. R y S****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
R22	Dañina al ser ingerida
R23	Tóxica al ser inhalada
R24	Tóxica en contacto con la piel
R25	Tóxica al ser ingerida
R26	Muy tóxica al ser inhalada
R27	Muy tóxica en contacto con la piel
R28	Muy tóxica al ser ingerida
R29	Libera gas tóxico en contacto con el agua
R30	Puede volverse sumamente inflamable al ser usada

## Anexo 1c Continuación

R31	Libera gas tóxico en contacto con ácidos
R32	Libera gas muy tóxico en contacto con ácidos
R33	Peligro de efectos acumulativos
R34	Causa quemaduras
R35	Causa quemaduras graves
R36	Irrita los ojos
R37	Irrita el sistema respiratorio
R38	Irrita la piel
R39	Peligro de efectos irreversibles muy graves
R40	Posible riesgo de efectos irreversibles
R41	Riesgo de grave daño a los ojos
R42	Puede causar sensibilización al ser inhalada
R43	Puede causar sensibilización en contacto con la piel
R44	Riesgo de explosión al calentarse en un ambiente cerrado
R45	Puede causar cáncer
R46	Puede causar daño genético hereditario
R47	Puede causar defectos de nacimiento
R48	Peligro de grave daño para la salud por exposición prolongada
R49	Puede causar cáncer al ser inhalada
R50	Muy tóxica para organismos acuáticos
R51	Tóxica para organismos acuáticos
R52	Dañina para organismos acuáticos
R53	Puede causar efectos adversos de largo plazo en el ambiente acuático
R54	Tóxica para la flora
R55	Tóxica para la fauna
R56	Tóxica para los organismos del suelo
R57	Tóxica para las abejas
R58	Puede causar efectos adversos de largo plazo en el ambiente
R59	Peligrosa para la capa de ozono
R60	Puede perjudicar la fertilidad
R61	Puede causar daño fetal
R62	Posible riesgo de pérdida de fertilidad
R63	Posible riesgo de daño fetal
R64	Puede causar daño a lactantes

## Anexo 1c Continuación

**Indicaciones sobre precauciones de seguridad**

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

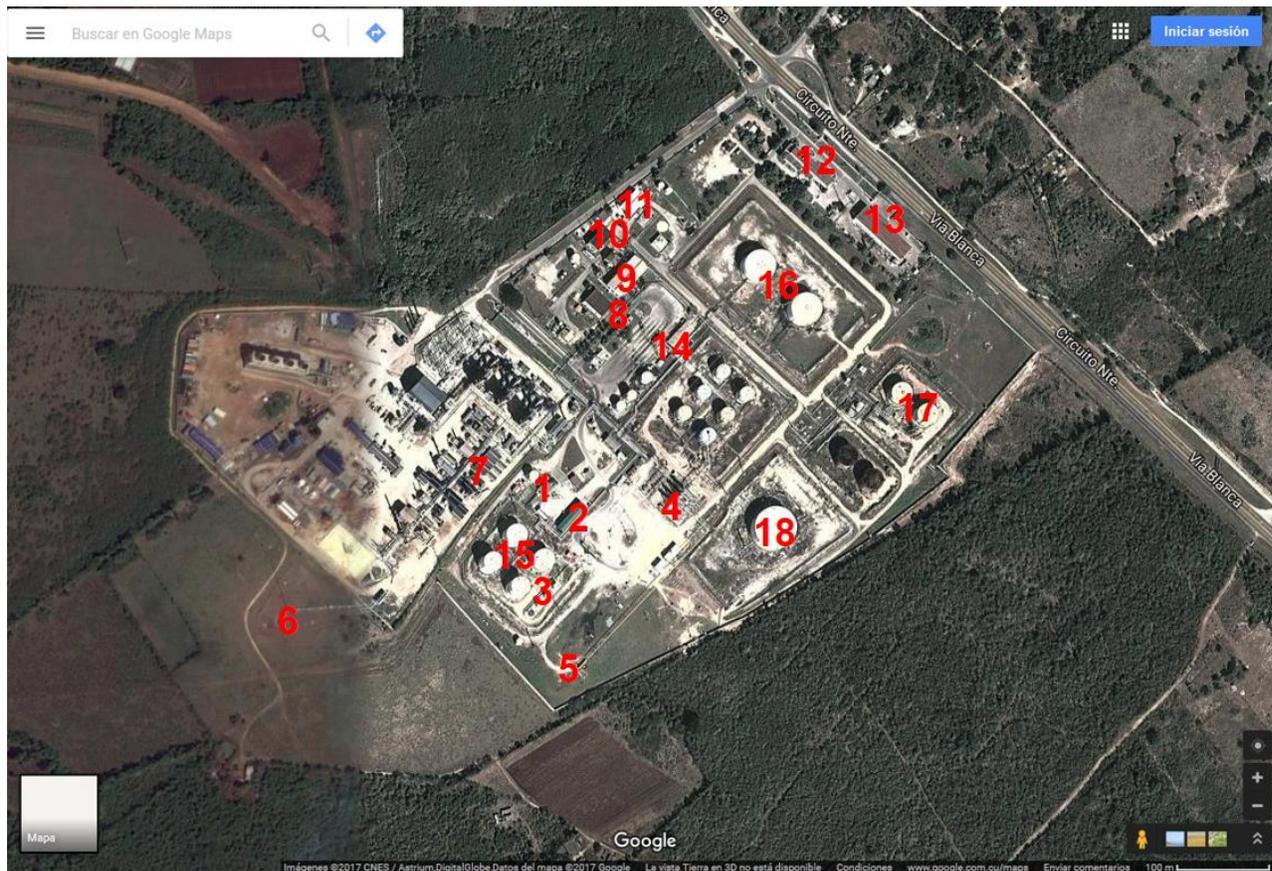
## Anexo 1c Continuación

S33	Tomar medidas preventivas contra descargas estáticas
S34	Evítense golpes y fricciones
S35	Este material y su envase deben desecharse de manera segura
S36	Usar ropa protectora apropiada
S37	Usar guantes apropiados
S38	En caso de ventilación insuficiente, úsese el equipo de respiración apropiado
S39	Úsese protección para ojos y cara
S40	Para limpiar el piso y todos los objetos contaminados por este material úsese ... (debe ser especificado por el fabricante)
S41	En caso de incendios o explosiones, no inhalar el humo
S42	Durante la fumigación o rociado, usar equipo de respiración apropiado (los términos adecuados deben ser especificados por el fabricante)
S43	En caso de incendio, usar ... (indíquese en el espacio el tipo específico de equipo contra incendios. Si el agua aumenta el riesgo, hay que indicar: "Nunca usar agua")
S44	En caso de accidente o indisposición, buscar asistencia médica (mostrar la etiqueta si es posible)
S45	En caso de accidentes o indisposición, buscar asistencia médica de inmediato (mostrar la etiqueta si es posible)
S46	En caso de ingestión, buscar asistencia médica de inmediato y mostrar el envase o la etiqueta
S47	Manténgase a temperatura no mayor que ... °C (debe ser especificada por el fabricante)
S48	Manténgase humedecido con ... (material apropiado que debe ser especificado por el fabricante)
S49	Manténgase únicamente en el envase original
S50	No mezclar con ... (debe ser especificado por el fabricante)
S51	Úsese solo en áreas bien ventiladas
S52	No recomendable para ser usado en interiores
S53	Evítense la exposición - obtener instrucciones especiales antes de su uso
S54	Obtener el consentimiento de las autoridades de control de la contaminación antes de descargar en plantas de tratamiento de aguas residuales
S55	Tratar con las mejores técnicas disponibles antes de descargar en desagües o ambientes acuáticos

**Anexo 1d: Composición cromatográfica del Gas Natural del Petróleo de la SES actualizada para el mes de abril según *ENERGAS*.**

<b>Componentes</b>	<b>Fracción porcentual</b>
Nitrógeno	0.288
Dióxido de Carbono	15.172
Sulfuro de Hidrógeno	10.600
Metano	37.066
Etano	5.954
Propano	8.354
i Butano	4.705
n- Butano	8.450
i Pentano	3.937
n- Pentano	2.113
Hexano	2.689
Heptano	0.672
Agua	0
Total	100

## Anexo 2: Localización de las áreas de la planta.



### Leyenda:

- 1- Oficina de Jefe de Turno y Sistema Contra Incendios (SCI) de la Estación Cabecera del Oleoducto.
- 2- Área de Bombas Magistrales.
- 3- Almacén de Nafta.
- 4- Segunda Etapa de Separación. SES
- 5- Flare de la Planta de Procesamiento de Crudo.
- 6- Flare de *ENERGAS*.
- 7- Turbinas de *ENERGAS*.
- 8- Cuarto de Control 48.
- 9- Área de Generación de Vapor.
- 10- Grupos Electrógenos.
- 11- Taller Mecánico.
- 12- Oficinas de la UEB Producción.
- 13- Taller Eléctrico.
- 14- Casa de Bombas.
- 15- Tanques de Crudo de la Estación Cabecera del Oleoducto.
- 16- Tanques de Tratamiento 7 y 8 (10000 m<sup>3</sup>).
- 17- Tanques de Tratamiento 15 y 16 (5000 m<sup>3</sup>).
- 18- Tanque de Tratamiento 14 (20000 m<sup>3</sup>).

**Anexo 3: Resultados del Árbol de Sucesos del gas natural correspondiente a la SES.**

<b>Cadena de sucesos</b>	<b>Escenarios probables</b>	<b>Frecuencia (a<sup>-1</sup>)</b>
A	<i>Jet Fire</i>	0,0016
B	<i>Jet Fire</i>	0,0142
C	<i>Jet Fire/BLEVE</i>	0,0016
D	<i>Jet Fire</i>	0,0142
E	<i>Jet Fire</i>	0,0018
F	<i>Jet Fire</i>	0,0166
G	<i>Jet Fire/BLEVE</i>	0,0018
H	<i>Jet Fire</i>	0,0166
I1	Nube tóxica	0,2893
I2	Nube tóxica	0,3310
J	<i>Jet Fire</i>	0,0019
K	<i>Jet Fire</i>	0,0188
L	<i>Jet Fire/BLEVE</i>	0,0019
M	<i>Jet Fire</i>	0,0188
N	<i>Jet Fire</i>	0,0021
N̄	<i>Jet Fire</i>	0,0194
O	<i>Jet Fire/BLEVE</i>	0,0021
P	<i>Jet Fire</i>	0,0194
Q	VCE	0,159
R	<i>Jet Fire</i>	0,0019
S	<i>Jet Fire</i>	0,0172
T	<i>Jet Fire/BLEVE</i>	0,0019
U	<i>Jet Fire</i>	0,0172
V	<i>Jet Fire</i>	0,0022
W	<i>Jet Fire</i>	0,0196
X	<i>Jet Fire/BLEVE</i>	0,0022
Y	<i>Jet Fire</i>	0,0196
Z1	Nube tóxica	0,2276
Z2	Nube tóxica	0,2603

Fuente: Elaboración propia.

**Anexo 4: Resultado de las áreas de atmósferas peligrosas evaluadas por ALOHA en la SES.**

**Anexo 4a: Comportamiento de las áreas de atmósferas peligrosas para la Nube Inflamable.**

Temperatura(°C)		23.81	Segunda Etapa de Separación		
Nubosidad		4			
Humedad (%)		73			
Dirección del Viento	Vel Media del Viento (m/s)	Sobrepresión (psi)	Largo (m)	Ancho (m)	Afectación de locales interiores (min)
NNE (D)	4,08	LOC-3	41	8	50
		LOC-2	59	14	60
		LOC-1	202	24	40
NNE (F)	4,08	LOC-3	52	18	40
		LOC-2	75	19	-
		LOC-1	261	32	40
ENE (D)	4,69	LOC-3	40	8	-
		LOC-2	58	16	-
		LOC-1	200	22	-
ENE (F)	4,69	LOC-3	51	14	60
		LOC-2	73	18	-
		LOC-1	278	30	-
SSE (D)	3,03	LOC-3	42	10	50
		LOC-2	61	20	60
		LOC-1	206	30	50
SSE (F)	3,03	LOC-3	54	20	50
		LOC-2	79	22	-
		LOC-1	271	40	60
E (D)	4,28	LOC-3	41	7	-
		LOC-2	58	16	-
		LOC-1	201	22	40
E (F)	4,28	LOC-3	52	15	50
		LOC-2	74	19	-
		LOC-1	260	26	60
SW (D)	2,42	LOC-3	44	14	-
		LOC-2	63	24	-
		LOC-1	210	41	60
SW (F)	2,42	LOC-3	58	20	50
		LOC-2	84	30	-
		LOC-1	281	44	60
SSW (D)	2,78	LOC-3	43	11	40
		LOC-2	62	20	-
		LOC-1	207	32	40
SSW (F)	2,78	LOC-3	55	18	40
		LOC-2	81	28	-
		LOC-1	274	44	-
CALMA	≤ 1	LOC-3	88	70	50
		LOC-2	126	90	-
		LOC-1	375	140	60

**Fuente:** Elaboración propia.

**Anexo 4b. Comportamiento de las áreas de atmósferas peligrosas para la VCE.**

Temperatura(°C)		23,81	Segunda Etapa de Separación		
Nubosidad		4			
Humedad (%)		73			
Dirección del Viento	Vel Media del Viento (m/s)	Sobrepresión (psi)	Largo (m)	Ancho (m)	Afectación de locales interiores
NNE (D)	4,08	LOC-3	-	-	-
		LOC-2	40	24	-
		LOC-1	55	76	-
NNE (F)	4,08	LOC-3	-	-	-
		LOC-2	53	26	-
		LOC-1	69	82	-
ENE (D)	4,69	LOC-3	-	-	-
		LOC-2	36	22	-
		LOC-1	53	72	-
ENE (F)	4,69	LOC-3	-	-	-
		LOC-2	48	24	-
		LOC-1	63	82	-
SSE (D)	3,03	LOC-3	-	-	-
		LOC-2	41	24	-
		LOC-1	61	85	-
SSE (F)	3,03	LOC-3	-	-	-
		LOC-2	54	30	-
		LOC-1	73	92	-
E (D)	4,28	LOC-3	-	-	-
		LOC-2	38	22	-
		LOC-1	54	73	-
E (F)	4,28	LOC-3	-	-	-
		LOC-2	51	24	-
		LOC-1	68	84	-
SW (D)	2,42	LOC-3	-	-	-
		LOC-2	49	27	-
		LOC-1	65	94	-
SW (F)	2,42	LOC-3	-	-	-
		LOC-2	56	30	-
		LOC-1	78	104	-
SSW (D)	2,78	LOC-3	-	-	-
		LOC-2	43	28	-
		LOC-1	64	88	-
SSW (F)	2,78	LOC-3	-	-	-
		LOC-2	55	25	-
		LOC-1	75	100	-
CALMA	≤ 1	LOC-3	-	-	-
		LOC-2	90	50	-
		LOC-1	120	162	-

**Fuente:** Elaboración propia.

**Anexo 4c: Comportamiento de las áreas de atmósferas peligrosas para el Jet Fire.**

Temperatura(°C)		23,81	Segunda Etapa de Separación		
Nubosidad		4			
Humedad (%)		73			
Dirección del Viento	Vel Media del Viento (m/s)	Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Largo (m)	Ancho (m)	Afectación de locales interiores
NNE (D)	4,08	LOC-3	15	23	-
		LOC-2	23	38	-
		LOC-1	35	64	-
NNE (F)	4,08	LOC-3	13	22	-
		LOC-2	22	38	-
		LOC-1	35	66	-
ENE (D)	4,69	LOC-3	16	24	-
		LOC-2	24	40	-
		LOC-1	36	65	-
ENE (F)	4,69	LOC-3	14	22	-
		LOC-2	23	38	-
		LOC-1	35	64	-
SSE (D)	3,03	LOC-3	14	22	-
		LOC-2	22	38	-
		LOC-1	35	63	-
SSE (F)	3,03	LOC-3	12	21	-
		LOC-2	21	34	-
		LOC-1	34	63	-
E (D)	4,28	LOC-3	16	13	-
		LOC-2	23	39	-
		LOC-1	35	64	-
E (F)	4,28	LOC-3	14	22	-
		LOC-2	22	38	-
		LOC-1	35	64	-
SW (D)	2,42	LOC-3	12	22	-
		LOC-2	21	37	-
		LOC-1	34	64	-
SW (F)	2,42	LOC-3	10	20	-
		LOC-2	20	36	-
		LOC-1	34	64	-
SSW (D)	2,78	LOC-3	13	22	-
		LOC-2	22	38	-
		LOC-1	35	64	-
SSW (F)	2,78	LOC-3	11	20	-
		LOC-2	21	34	-
		LOC-1	34	65	-
CALMA	≤ 1	LOC-3	10	20	-
		LOC-2	17	33	-
		LOC-1	32	62	-

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 4d: Comportamiento de las áreas de atmósferas peligrosas para la Nube Tóxica.**

Temperatura(°C)		23,81	Segunda Etapa de Separación		
Nubosidad		4			
Humedad (%)		73			
Dirección del Viento	Vel Media del Viento (m/s)	Conc (ppm)	Largo (m)	Ancho (m)	Afectación de locales interiores (min)
NNE (D)	4,08	TEEL-3	45	8	35
		TEEL-2	125	19	40
		TEEL-1	167	24	-
NNE (F)	4,08	TEEL-3	57	18	50
		TEEL-2	180	26	50
		TEEL-1	255	34	-
ENE (D)	4,69	TEEL-3	44	8	30
		TEEL-2	115	16	40
		TEEL-1	154	23	-
ENE (F)	4,69	TEEL-3	55	14	60
		TEEL-2	177	30	50
		TEEL-1	252	30	-
SSE (D)	3,03	TEEL-3	46	12	40
		TEEL-2	142	24	40
		TEEL-1	188	30	-
SSE (F)	3,03	TEEL-3	61	24	55
		TEEL-2	188	30	60
		TEEL-1	264	38	-
E (D)	4,28	TEEL-3	45	8	40
		TEEL-2	121	20	50
		TEEL-1	161	24	-
E (F)	4,28	TEEL-3	56	18	40
		TEEL-2	179	26	60
		TEEL-1	253	34	-
SW (D)	2,42	TEEL-3	49	15	60
		TEEL-2	146	17	50
		TEEL-1	206	40	-
SW (F)	2,42	TEEL-3	65	30	40
		TEEL-2	197	40	60
		TEEL-1	275	53	-
SSW (D)	2,78	TEEL-3	47	13	40
		TEEL-2	144	26	40
		TEEL-1	199	35	-
SSW (F)	2,78	TEEL-3	63	20	40
		TEEL-2	191	35	50
		TEEL-1	268	45	-
CALMA	≤ 1	TEEL-3	98	90	50
		TEEL-2	273	130	60
		TEEL-1	367	140	-

**Fuente:** Elaboración propia.

**Anexo 5: Áreas de atmósferas peligrosas en el almacén de nafta.**  
**Anexo 5a: Áreas de atmósferas peligrosas para la Nube Inflamable.**

Temperatura(°C)		23.81	Almacén de nafta. ECO		
Nubosidad		4			
Humedad (%)		73			
Dirección del Viento	Vel Media del Viento (m/s)	Sobrepresión (psi)	Largo (m)	Ancho (m)	Afectación en locales interiores (min)
NNW (D)	3,72	LOC-3	23	-	-
		LOC-2	35	-	-
		LOC-1	119	30	40
NNW (F)	3,72	LOC-3	44	-	-
		LOC-2	60	42	40
		LOC-1	181	74	60
E (D)	4,28	LOC-3	21	-	-
		LOC-2	32	-	-
		LOC-1	112	50	50
E (F)	4,28	LOC-3	38	-	-
		LOC-2	54	41	50
		LOC-1	169	64	60
SSW (D)	2,78	LOC-3	32	-	-
		LOC-2	45	-	-
		LOC-1	136	78	60
SSW (F)	2,78	LOC-3	54	60	50
		LOC-2	75	60	-
		LOC-1	208	100	-
S (D)	2,94	LOC-3	30	-	-
		LOC-2	44	-	-
		LOC-1	133	74	50
S (F)	2,94	LOC-3	53	56	50
		LOC-2	72	68	-
		LOC-1	203	100	60
SSE (D)	3,03	LOC-3	29	-	-
		LOC-2	43	-	-
		LOC-1	131	73	60
SSE (F)	3,03	LOC-3	52	50	45
		LOC-2	70	60	-
		LOC-1	200	94	60
WSW (D)	2,33	LOC-3	36	-	-
		LOC-2	53	56	55
		LOC-1	148	90	60
WSW (F)	2,33	LOC-3	64	74	55
		LOC-2	86	85	-
		LOC-1	228	140	-
SW (D)	2,42	LOC-3	36	-	-
		LOC-2	52	56	50
		LOC-1	146	90	-
SW (F)	2,42	LOC-3	62	60	60
		LOC-2	83	80	-
		LOC-1	224	120	-
CALMA	≤ 1	LOC-3	131	280	40
		LOC-2	159	290	-
		LOC-1	337	440	-

**Fuente:** Elaboración propia.

**Anexo 5b: Comportamiento de las áreas de atmósferas peligrosas para la VCE.**

Temperatura(°C)		23.81	Almacén de nafta. ECO		
Nubosidad		4			
Humedad (%)		73			
Dirección del Viento	Vel Media del Viento (m/s)	Sobrepresión (psi)	Largo (m)	Ancho (m)	Afectación de locales interiores (min)
NNW (D)	3,72	LOC-3	-	-	
		LOC-2	27	19	
		LOC-1	44	67	
NNW (F)	3,72	LOC-3	-	-	
		LOC-2	48	26	
		LOC-1	65	90	
E (D)	4,28	LOC-3	-	-	
		LOC-2	19	17	
		LOC-1	40	60	
E (F)	4,28	LOC-3	-	-	
		LOC-2	39	24	
		LOC-1	57	82	
SSW (D)	2,78	LOC-3	-	-	
		LOC-2	30	25	
		LOC-1	55	86	
SSW (F)	2,78	LOC-3	-	-	
		LOC-2	56	32	
		LOC-1	81	108	
S (D)	2,94	LOC-3	-	-	
		LOC-2	32	26	
		LOC-1	54	84	
S (F)	2,94	LOC-3	-	-	
		LOC-2	52	32	
		LOC-1	77	109	
SSE (D)	3,03	LOC-3	-	-	
		LOC-2	31	22	
		LOC-1	52	80	
SSE (F)	3,03	LOC-3	-	-	
		LOC-2	54	32	
		LOC-1	74	108	
WSW (D)	2,33	LOC-3	-	-	
		LOC-2	40	30	
		LOC-1	64	98	
WSW (F)	2,33	LOC-3	-	-	
		LOC-2	64	38	
		LOC-1	89	126	
SW (D)	2,42	LOC-3	-	-	
		LOC-2	40	28	
		LOC-1	62	98	
SW (F)	2,42	LOC-3	-	-	
		LOC-2	62	36	
		LOC-1	87	124	
CALMA	≤ 1	LOC-3	-	-	
		LOC-2	128	54	
		LOC-1	165	175	

**Fuente:**

Elaboración propia.

**Anexo 5c: Áreas de atmósferas peligrosas generadas por la Nube Tóxica.**

Temperatura(°C)		23.81	Almacén de nafta. ECO		
Nubosidad		4			
Humedad (%)		73			
Dirección del Viento	Vel Media del Viento (m/s)	Concentración . (ppm)	Largo (m)	Ancho (m)	Afectación de locales interiores (min)
NNW (D)	3,72	TEEL-3	116	56	50
		TEEL-2	298	88	-
		TEEL-1	414	112	-
NNW (F)	3,72	TEEL-3	176	90	45
		TEEL-2	431	110	-
		TEEL-1	592	130	-
E (D)	4,28	TEEL-3	109	50	40
		TEEL-2	285	80	60
		TEEL-1	398	100	-
E (F)	4,28	TEEL-3	164	60	40
		TEEL-2	411	100	60
		TEEL-1	568	112	-
SSW (D)	2,78	TEEL-3	133	80	40
		TEEL-2	326	60	-
		TEEL-1	448	140	-
SSW (F)	2,78	TEEL-3	203	104	40
		TEEL-2	475	160	-
		TEEL-1	643	164	-
S (D)	2,94	TEEL-3	129	70	45
		TEEL-2	321	105	-
		TEEL-1	442	120	-
S (F)	2,94	TEEL-3	198	106	45
		TEEL-2	466	136	-
		TEEL-1	632	162	-
SSE (D)	3,03	TEEL-3	127	74	40
		TEEL-2	317	110	60
		TEEL-1	437	125	-
SSE (F)	3,03	TEEL-3	194	92	40
		TEEL-2	461	130	-
		TEEL-1	627	156	-
WSW (D)	2,33	TEEL-3	145	98	40
		TEEL-2	344	130	-
		TEEL-1	469	166	-
WSW (F)	2,33	TEEL-3	222	113	40
		TEEL-2	506	175	-
		TEEL-1	678	200	-
SW (D)	2,42	TEEL-3	142	90	45
		TEEL-2	340	130	-
		TEEL-1	465	143	-
SW (F)	2,42	TEEL-3	218	120	40
		TEEL-2	499	180	-
		TEEL-1	670	190	-
CALMA	≤ 1	TEEL-3	330	400	35
		TEEL-2	646	500	-
		TEEL-1	813	600	-

**Fuente:** Elaboración propia.

### Anexo 5d: Comportamiento de las áreas de atmósferas peligrosas para el *Pool Fire*.

Temperatura(°C)		23.81	Almacén de nafta. ECO		
Nubosidad		4			
Humedad (%)		73			
Dirección del Viento	Vel Media del Viento (m/s)	Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Largo (m)	Ancho (m)	Afectación de locales interiores (min)
NNW (D)	3,72	LOC-3	19	26	
		LOC-2	25	40	
		LOC-1	37	65	
NNW (F)	3,72	LOC-3	17	28	
		LOC-2	24	40	
		LOC-1	37	66	
E (D)	4,28	LOC-3	20	28	
		LOC-2	26	40	
		LOC-1	37	64	
E (F)	4,28	LOC-3	18	28	
		LOC-2	25	40	
		LOC-1	37	66	
SSW (D)	2,78	LOC-3	17	28	
		LOC-2	24	42	
		LOC-1	37	67	
SSW (F)	2,78	LOC-3	13	26	
		LOC-2	20	40	
		LOC-1	33	66	
S (D)	2,94	LOC-3	13	26	
		LOC-2	20	41	
		LOC-1	23	67	
S (F)	2,94	LOC-3	13	26	
		LOC-2	20	42	
		LOC-1	33	68	
SSE (D)	3,03	LOC-3	18	27	
		LOC-2	25	40	
		LOC-1	37	65	
SSE (F)	3,03	LOC-3	13	26	
		LOC-2	20	40	
		LOC-1	33	68	
WSW (D)	2,33	LOC-3	13	26	
		LOC-2	21	40	
		LOC-1	34	66	
WSW (F)	2,33	LOC-3	13	25	
		LOC-2	20	40	
		LOC-1	33	67	
SW (D)	2,42	LOC-3	15	25	
		LOC-2	22	40	
		LOC-1	35	67	
SW (F)	2,42	LOC-3	13	17	
		LOC-2	20	40	
		LOC-1	33	68	
CALMA	≤ 1	LOC-3	13	26	
		LOC-2	20	40	
		LOC-1	33	68	

**Fuente:** Elaboración propia.

**Anexo 6: Comportamiento de las áreas de atmósferas peligrosas generadas por la BLEVE.**

Dirección del viento	Velocidad del viento (m/s)	Niveles de radiación	Diámetro (m)
Calma	≤ 1	LOC-3	1208
		LOC-2	1704
		LOC-1	2600

**Fuente:** Elaboración propia.

**Anexo 7: Resultados de la evaluación de *Probit* para los escenarios de SES.**

**Anexo 7a: Porcentaje de afectaciones obtenidos por *Probit* para el escenario VCE en las diferentes direcciones del viento.**

Afectación	Dirección del Viento	SSE						
	Distancias (m)	10	20	30	40	50	60	70
	Sobrepresión (psi)	6,33	6,33	6,33	6,33	5,51	2	1,11
Rotura de Tímpano	Índice Probit	5,02	5,02	5,02	5,02	4,752	2,796	1,66
	Porcentaje de Afectaciones	50,44	50,44	50,44	50,44	40,04	1,542	0
Muerte por impacto del cuerpo	Índice Probit	5,396	5,396	5,396	5,396	4,727	-0,157	-2,995
	Porcentaje de Afectaciones	64,82	64,82	64,82	64,82	39,1	0	0
Lesiones por Impacto del Cuerpo	Índice Probit	8,443	8,443	8,443	8,443	7,826	3,316	0,696
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	100	100	100	4,619	0

Afectación	Dirección del Viento	ENE						
	Distancias (m)	10	20	30	40	50	60	70
	Sobrepresión (psi)	6,33	6,33	6,33	6,33	2,51	1,2	0,81
Rotura de Tímpano	Índice Probit	5,02	5,02	5,02	5,02	3,234	1,81	1,052
	Porcentaje de Afectaciones	50,44	50,44	50,44	50,44	3,994	0	0
Muerte por impacto del cuerpo	Índice Probit	5,396	5,396	5,396	5,396	0,937	-2,62	-4,514
	Porcentaje de Afectaciones	64,82	64,82	64,82	64,82	0	0	0
Lesiones por Impacto del Cuerpo	Índice Probit	8,443	8,443	8,443	8,443	4,327	1,043	-0,706
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	100	100	24,92	0	0

Afectación	Dirección del Viento	SW						
	Distancias (m)	10	20	30	40	50	60	70
	Sobrepresión (psi)	6,33	6,33	6,33	6,33	6,33	2,42	1,3
Rotura de Tímpano	Índice Probit	5,02	5,02	5,02	5,02	5,02	3,164	1,965
	Porcentaje de Afectaciones	50,44	50,44	50,44	50,44	50,44	3,53	0
Muerte por impacto del cuerpo	Índice Probit	5,396	5,396	5,396	5,396	5,396	0,761	-2,234
	Porcentaje de Afectaciones	64,82	64,82	64,82	64,82	64,82	0	0
Lesiones por Impacto del Cuerpo	Índice Probit	8,443	8,443	8,443	8,443	8,443	4,164	1,399
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	100	100	100	19,98	0

Afectación	Dirección del Viento	SSW						
	Distancias (m)	10	20	30	40	50	60	70
	Sobrepresión (psi)	6,33	6,33	6,33	6,33	6,33	2,08	1,12
Rotura de Tímpano	Índice Probit	5,02	5,02	5,02	5,02	5,02	2,872	1,677
	Porcentaje de Afectaciones	50,44	50,44	50,44	50,44	50,44	1,975	0
Muerte por impacto del cuerpo	Índice Probit	5,396	5,396	5,396	5,396	5,396	0,032	-2,952
	Porcentaje de Afectaciones	64,82	64,82	64,82	64,82	64,82	-688,2	0
Lesiones por Impacto del Cuerpo	Índice Probit	8,443	8,443	8,443	8,443	8,443	3,49	0,736
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	100	100	100	6,368	0

Afectación	Dirección del Viento	E						
	Distancias (m)	10	20	30	40	50	60	70
	Sobrepresión (psi)	6,33	6,33	6,33	6,33	3,89	1,5	0,93
Rotura de Tímpano	Índice Probit	5,02	5,02	5,02	5,02	4,08	2,241	1,318
	Porcentaje de Afectaciones	50,44	50,44	50,44	50,44	17,66	0	0
Muerte por impacto del cuerpo	Índice Probit	5,396	5,396	5,396	5,396	3,049	-1,544	-3,848
	Porcentaje de Afectaciones	64,82	64,82	64,82	64,82	2,883	0	0
Lesiones por Impacto del Cuerpo	Índice Probit	8,443	8,443	8,443	8,443	6,276	2,036	-0,092
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	100	100	89,37	0	0

Afectación	Dirección del Viento	CALMA							
	Distancias (m)	20	40	60	70	80	90	100	110
	Sobrepresión (psi)	6,33	6,33	6,33	6,33	5,75	2,58	1,62	1,17
Rotura de Tímpano	Índice Probit	5,02	5,02	5,02	5,02	4,83	3,29	2,39	1,76
	Porcentaje de Afectaciones	50,44	50,44	50,44	50,44	43,20	4,39	0,00	0,00
Muerte por impacto del cuerpo	Índice Probit	5,40	5,40	5,40	5,40	4,93	1,07	-1,17	-2,74
	Porcentaje de Afectaciones	64,82	64,82	64,82	64,82	47,04	0,00	0,00	0,00
Lesiones por Impacto del Cuerpo	Índice Probit	8,44	8,44	8,44	8,44	8,02	4,45	2,38	0,93
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	100	100	100	28,98	0,00	0,00

**Fuente:** Elaboración propia.

**Anexo 7b: Porcentaje de afectaciones obtenidos por *Probit* para el escenario *Jet Fire* en las diferentes direcciones del viento.**

Afectación	Dirección del Viento	SSE						
	Distancias (m)	5	10	15	20	25	30	35
	Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	13,5	10,7	7,54	4,94	3,68	2,7	1,87
Muerte por Quemaduras	Índice Probit	5,7138	4,9204	3,7257	2,2823	1,2773	0,2203	-1,0335
	Porcentaje de Afectaciones	75,642	46,552	9,8133	-5,5833	0	0	0
Quemaduras de 2do Grado	Índice Probit	7,5002	6,5646	5,1557	3,4537	2,2685	1,0221	-0,4564
	Porcentaje de Afectaciones	99,899	93,311	55,74	5,9474	0	0	0
Quemadura de 1er Grado	Índice Probit	10,807	9,8713	8,4625	6,7606	5,5755	4,3292	2,8508
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	100	94,96	71,147	24,995	1,8599

Afectación	Dirección del Viento	ENE							
	Distancias (m)	5	10	15	20	25	30	35	40
	Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	18,9	14,1	9,48	5,96	3,95	3,03	2,08	1,49
Muerte por Quemaduras	Índice Probit	6,86	5,86	4,51	2,92	1,52	0,61	-0,67	-1,81
	Porcentaje de Afectaciones	95,58	80,02	31,01	2,24	0,00	0,00	0,00	0,00
Quemaduras de 2do Grado	Índice Probit	8,85	7,68	6,08	4,21	2,55	1,49	-0,03	-1,37
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	85,43	21,29	0,00	0,00	0,00	0,00
Quemadura de 1er Grado	Índice Probit	12,16	10,98	9,38	7,52	5,86	4,79	3,28	1,94
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	100	100	79,97	41,62	4,32	0,00

Afectación	Dirección del Viento	SW						
	Distancias (m)	5	10	15	20	25	30	35
	Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	12,2	10,4	7,23	5,01	3,38	2,36	1,76
Muerte por Quemaduras	Índice Probit	5,3682	4,8234	3,5824	2,3304	0,987	-0,2391	-1,2404
	Porcentaje de Afectaciones	63,801	42,777	7,5546	0	0	0	0
Quemaduras de 2do Grado	Índice Probit	7,0926	6,4501	4,9867	3,5103	1,9262	0,4804	-0,7004
	Porcentaje de Afectaciones	96,687	91,986	49,145	6,608	0	0	0
Quemadura de 1er Grado	Índice Probit	10,399	9,7568	8,2935	6,8172	5,2332	3,7875	2,6068
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	100	95,319	58,724	10,948	0,0424

Afectación	Dirección del Viento	SSW						
	Distancias (m)	5	10	15	20	25	30	35
	Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	12,9	10,3	7,3	5	3,48	2,58	1,95
Muerte por Quemaduras	Índice Probit	5,5587	4,7904	3,6153	2,3235	1,0865	0,0651	-0,8905
	Porcentaje de Afectaciones	70,576	41,506	8,0278	0	0	0	0
Quemaduras de 2do Grado	Índice Probit	7,3172	6,4112	5,0255	3,5023	2,0436	0,8391	-0,2878
	Porcentaje de Afectaciones	97,999	91,466	50,664	6,5098	-14,329	0	0
Quemadura de 1er Grado	Índice Probit	10,624	9,7179	8,3323	6,8092	5,3506	4,1462	3,0194
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	100	95,271	63,148	19,467	2,7296

Afectación	Dirección del Viento	E						
	Distancias (m)	5	10	15	20	25	30	35
	Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	16,7	14	9,09	6,24	3,86	2,78	2
Muerte por Quemaduras	Índice Probit	6,4399	5,838	4,3638	3,0797	1,4403	0,32	-0,8041
	Porcentaje de Afectaciones	91,853	79,337	26,121	3,0456	0	0	0
Quemaduras de 2do Grado	Índice Probit	8,3564	7,6466	5,9082	4,394	2,4607	1,1396	-0,1859
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	81,27	27,12	0	0	0
Quemadura de 1er Grado	Índice Probit	11,663	10,953	9,215	7,7009	5,7677	4,4467	3,1213
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	100	100	77,287	28,903	3,2766

Afectación	Dirección del Viento	CALMA						
	Distancias (m)	5	10	15	20	25	30	35
	Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	9,41	7,85	5,99	4,17	3,11	2,3	1,69
Muerte por Quemaduras	Índice Probit	4,48	3,86	2,94	1,70	0,70	-0,33	-1,38
	Porcentaje de Afectaciones	30,12	12,47	2,33	0,00	0,00	0,00	0,00
Quemaduras de 2do Grado	Índice Probit	6,05	5,32	4,23	2,77	1,59	0,38	-0,86
	Porcentaje de Afectaciones	84,75	61,93	21,89	1,39	0,00	0,00	0,00
Quemadura de 1er Grado	Índice Probit	9,35	8,62	7,54	6,08	4,90	3,68	2,44
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	100	85,46	45,68	9,10	0,00

Fuente: Elaboración propia.

**Anexo 8: Resultados de la evaluación de *Probit* para los escenarios evaluados en el almacén de nafta.**

**Anexo 8a: Porcentaje de afectaciones obtenidos por *Probit* para el escenario VCE en las diferentes direcciones del viento.**

Afectación	Dirección del Viento	NNW						
	Distancias (m)	10	20	30	40	50	60	70
	Sobrepresión (psi)	6,33	6,33	6,33	6,33	2,13	1,23	0,859
Rotura de Tímpano	Índice Probit	5,0198	5,0198	5,0198	5,0198	2,9177	1,8579	1,165
	Porcentaje de Afectaciones	50,439	50,439	50,439	50,439	2,2147	0	0
Muerte por impacto del cuerpo	Índice Probit	5,396	5,396	5,396	5,396	0,1462	0	0
	Porcentaje de Afectaciones	64,821	64,821	64,821	64,821	0	0	0
Lesiones por Impacto del Cuerpo	Índice Probit	8,443	8,443	8,443	8,443	3,5962	1,1526	-0,445
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	100	100	7,7496	0	0

Afectación	Dirección del Viento	E						
	Distancias (m)	10	20	30	40	50	60	70
	Sobrepresión (psi)	6,33	6,33	6,33	3,1	1,24	0,933	
Rotura de Tímpano	Índice Probit	5,0198	5,0198	5,0198	3,6419	1,8735	1,3245	
	Porcentaje de Afectaciones	50,439	50,439	50,439	8,4312	0	0	
Muerte por impacto del cuerpo	Índice Probit	5,396	5,396	5,396	1,955	-2,4615	-3,833	
	Porcentaje de Afectaciones	64,821	64,821	64,821	0	0	0	
Lesiones por Impacto del Cuerpo	Índice Probit	8,443	8,443	8,443	5,2662	1,1887	-0,077	
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	100	59,978	0	0	

Afectación	Dirección del Viento	S						
	Distancias (m)	10	20	30	40	50	60	70
	Sobrepresión (psi)	6,33	6,33	6,33	6,33	4,78	1,81	1,15
Rotura de Tímpano	Índice Probit	5,0198	5,0198	5,0198	5,0198	4,4777	2,6035	1,7281
	Porcentaje de Afectaciones	50,439	50,439	50,439	50,439	29,975	0,008	0
Muerte por impacto del cuerpo	Índice Probit	5,396	5,396	5,396	5,396	4,0423	-0,638	-2,825
	Porcentaje de Afectaciones	64,821	64,821	64,821	64,821	16,667	0	0
Lesiones por Impacto del Cuerpo	Índice Probit	8,443	8,443	8,443	8,443	7,1932	2,8717	0,8534
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	100	100	97,194	1,974	0

Afectación	Dirección del Viento	SSW						
	Distancias (m)	10	20	30	40	50	60	70
	Sobrepresión (psi)	6,33	6,33	6,33	6,33	6,33	2,24	1,35
Rotura de Tímpano	Índice Probit	5,0198	5,0198	5,0198	5,0198	5,0198	3,0148	2,0375
	Porcentaje de Afectaciones	50,439	50,439	50,439	50,439	50,439	2,7063	0
Muerte por impacto del cuerpo	Índice Probit	5,396	5,396	5,396	5,396	5,396	0,3889	-2,052
	Porcentaje de Afectaciones	64,821	64,821	64,821	64,821	64,821	0	0
Lesiones por Impacto del Cuerpo	Índice Probit	8,443	8,443	8,443	8,443	8,443	3,8202	1,5669
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	100	100	100	11,59	0

Afectación	Dirección del Viento	SSE					
	Distancias (m)	10	20	30	40	50	60
	Sobrepresión (psi)	6,33	6,33	6,33	6,33	5,47	1,68
Rotura de Tímpano	Índice Probit	5,0198	5,0198	5,0198	5,0198	4,738	2,4596
	Porcentaje de Afectaciones	50,439	50,439	50,439	50,439	39,5	0
Muerte por impacto del cuerpo	Índice Probit	5,396	5,396	5,396	5,396	4,6922	-0,998
	Porcentaje de Afectaciones	64,821	64,821	64,821	64,821	37,768	0
Lesiones por Impacto del Cuerpo	Índice Probit	8,443	8,443	8,443	8,443	7,7932	2,54
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	100	100	100	0

Afectación	Dirección del Viento	WSW							
	Distancias (m)	10	20	30	40	50	60	70	80
	Sobrepresión (psi)	6,33	6,33	6,33	6,33	6,33	5,77	2,15	1,26
Rotura de Tímpano	Índice Probit	5,0198	5,0198	5,0198	5,0198	5,0198	4,841	2,9357	1,9044
	Porcentaje de Afectaciones	50,439	50,439	50,439	50,439	50,439	43,46	2,3067	0
Muerte por impacto del cuerpo	Índice Probit	5,396	5,396	5,396	5,396	5,396	4,9495	0,1912	-2,384
	Porcentaje de Afectaciones	64,821	64,821	64,821	64,821	64,821	47,69	0	0
Lesiones por Impacto del Cuerpo	Índice Probit	8,443	8,443	8,443	8,443	8,443	8,0308	3,6377	1,2599
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	100	100	100	100	8,3665	0

Afectación	Dirección del Viento	SW						
	Distancias (m)	10	20	30	40	50	60	70
	Sobrepresión (psi)	6,33	6,33	6,33	6,33	6,33	4,39	1,62
Rotura de Tímpano	Índice Probit	5,0198	5,0198	5,0198	5,0198	5,0198	4,3134	2,3894
	Porcentaje de Afectaciones	50,439	50,439	50,439	50,439	50,439	24,493	0
Muerte por impacto del cuerpo	Índice Probit	5,396	5,396	5,396	5,396	5,396	3,632	-1,173
	Porcentaje de Afectaciones	64,821	64,821	64,821	64,821	64,821	8,2792	0
Lesiones por Impacto del Cuerpo	Índice Probit	8,443	8,443	8,443	8,443	8,443	6,8144	2,3782
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	100	100	100	95,303	0

Afectación	Dirección del Viento	CALMA						
	Distancias (m)	40	60	80	100	120	130	140
	Sobrepresión (psi)	6,33	6,33	6,33	6,33	5,66	2,33	1,58
Rotura de Tímpano	Índice Probit	5,02	5,02	5,02	5,02	4,80	3,09	2,34
	Porcentaje de Afectaciones	50,44	50,44	50,44	50,44	42,02	3,11	0,00
Muerte por impacto del cuerpo	Índice Probit	5,40	5,40	5,40	5,40	4,86	0,58	-1,29
	Porcentaje de Afectaciones	64,82	64,82	64,82	64,82	44,07	0,00	0,00
Lesiones por Impacto del Cuerpo	Índice Probit	8,44	8,44	8,44	8,44	7,95	4,00	2,27
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	100	100	100	15,49	0,00

Fuente: Elaboración propia.

### Anexo 8b: Porcentaje de afectaciones obtenidos por *Probit* para el escenario *Pool Fire* en las diferentes direcciones del viento.

Afectación	Dirección del Viento	NNW							
	Distancias (m)	5	10	15	20	25	30	35	40
	Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	45,9	20,9	11,8	7,06	4,7	2,96	2,26	1,58
Muerte por Quemaduras	Índice Probit	9,891	7,2057	5,2544	3,5012	2,1123	0,5341	-0,387	-1,609
	Porcentaje de Afectaciones	100	97,264	59,533	6,4963	0	0	0	0
Quemaduras de 2do Grado	Índice Probit	12,426	9,2594	6,9584	4,891	3,2532	1,3921	0,3061	-1,135
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	96,065	45,402	4,1286	0	0	0
Quemadura de 1er Grado	Índice Probit	15,732	12,566	10,265	8,1978	6,5602	4,6992	3,6132	2,1726
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	100	100	93,266	38,032	7,9973	0

Afectación	Dirección del Viento	E							
	Distancias (m)	5	10	15	20	25	30	35	40
	Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	59	24,6	13,8	7,55	4,7	3,12	2,2	1,66
Muerte por Quemaduras	Índice Probit	10,75	7,76	5,79	3,73	2,11	0,71	-0,48	-1,44
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	77,92	9,89	0,00	0,00	0,00	0,00
Quemaduras de 2do Grado	Índice Probit	13,44	9,92	7,59	5,16	3,25	1,60	0,20	-0,94
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	100	55,95	4,13	0,00	0,00	0,00
Quemadura de 1er Grado	Índice Probit	16,74	13,22	10,90	8,47	6,56	4,91	3,50	2,37
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	100	100	93,27	46,19	6,54	0,00

Afectación	Dirección del Viento	SSW							
	Distancias (m)	5	10	15	20	25	30	35	35
	Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	32,4	15,9	7,88	4,97	3,62	2,48	1,74	1,74
Muerte por Quemaduras	Índice Probit	8,7021	6,2724	3,8762	2,303	1,2212	-0,07	-1,279	-1,279
	Porcentaje de Afectaciones	100	89,304	12,751	0	0	0	0	0
Quemaduras de 2do Grado	Índice Probit	11,024	8,1588	5,3332	3,4781	2,2023	0,68	-0,746	-0,746
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	62,503	6,2229	0	0	0	0
Quemadura de 1er Grado	Índice Probit	14,33	11,465	8,64	6,785	5,5093	3,9871	2,5608	2,5608
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	100	95,12	68,873	15,288	0	0

Afectación	Dirección del Viento	S							
	Distancias (m)	5	10	15	20	25	30	35	35
	Radiación (W/m <sup>2</sup> )	29	15	7,93	5,2	3,5	2,33	1,65	1,65
Muerte por Quemaduras	Índice Probit	8,3237	6,0735	3,8978	2,4574	1,1061	-0,283	-1,461	-1,461
	Porcentaje de Afectaciones	100	85,34	13,22	0	0	0	0	0
Quemaduras de 2do Grado	Índice Probit	10,578	7,9243	5,3587	3,6601	2,0666	0,4289	-0,96	-0,96
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	63,449	8,7165	0	0	0	0
Quemadura de 1er Grado	Índice Probit	13,884	11,231	8,6655	6,967	5,3736	3,736	2,347	2,347
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	100	96,105	64,001	9,9954	0	0

Afectación	Dirección del Viento	WSW							
	Distancias (m)	5	10	15	20	25	30	35	40
	Radiación (W/m <sup>2</sup> )	32,4	15,9	8,29	4,97	3,26	2,33	1,79	1,35
Muerte por Quemaduras	Índice Probit	8,7021	6,2724	4,0494	2,303	0,8636	-0,283	-1,183	-2,146
	Porcentaje de Afectaciones	193,06	89,304	16,85	-5,049	-209,4	-1002	-2532	-5733
Quemaduras de 2do Grado	Índice Probit	11,024	8,1588	5,5374	3,4781	1,7807	0,4289	-0,632	-1,768
	Porcentaje de Afectaciones	2274,5	124,83	69,847	6,2229	-31,38	-406,4	-1470	-4233
Quemadura de 1er Grado	Índice Probit	14,33	11,465	8,8442	6,785	5,0877	3,736	2,6748	1,5394
	Porcentaje de Afectaciones	24468	3363,9	223,07	95,12	53,096	9,9954	0,6743	-56,87

Afectación	Dirección del Viento	SW						
	Distancias (m)	5	10	15	20	25	30	35
	Radiación (W/m <sup>2</sup> )	32,4	13,7	7,45	4,78	3,5	2,34	1,65
Muerte por Quemaduras	Índice Probit	8,7021	5,764	3,6847	2,17	1,1061	-0,268	-1,461
	Porcentaje de Afectaciones	100	77,177	9,1146	0	0	0	0
Quemaduras de 2do Grado	Índice Probit	11,024	7,5594	5,1074	3,3212	2,0666	0,4461	-0,96
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	53,862	4,6628	0	0	0
Quemadura de 1er Grado	Índice Probit	14,33	10,866	8,4142	6,6281	5,3736	3,7532	2,347
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	100	93,924	64,001	10,307	0

Afectación	Dirección del Viento	CALMA						
	Distancias (m)	5	10	15	20	25	30	35
	Radiación (W/m <sup>2</sup> )	37,4	15	7,88	4,98	3,5	2,33	1,7
Muerte por Quemaduras	Índice Probit	9,192	6,0735	3,8762	2,3099	1,1061	-0,283	-1,359
	Porcentaje de Afectaciones	100	85,34	12,751	0	0	0	0
Quemaduras de 2do Grado	Índice Probit	11,602	7,9243	5,3332	3,4861	2,0666	0,4289	-0,84
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	62,503	6,3173	0	0	0
Quemadura de 1er Grado	Índice Probit	14,908	11,231	8,64	6,7931	5,3736	3,736	2,4672
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	100	95,171	64,001	9,9954	0

Afectación	Dirección del Viento	SSE						
	Distancias (m)	5	10	15	20	25	30	35
	Radiación (W/m <sup>2</sup> )	31,5	15	7,91	4,98	3,5	2,41	1,7
Muerte por Quemaduras	Índice Probit	8,606	6,0735	3,8892	2,3099	1,1061	-0,168	-1,359
	Porcentaje de Afectaciones	100	85,34	13,031	0	0	0	0
Quemaduras de 2do Grado	Índice Probit	10,911	7,9243	5,3485	3,4861	2,0666	0,5647	-0,84
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	63,072	6,3173	0	0	0
Quemadura de 1er Grado	Índice Probit	14,217	11,231	8,6553	6,7931	5,3736	3,8718	2,4672
	Porcentaje de Afectaciones	100	100	100	95,171	64,001	12,657	0

Fuente: Elaboración propia.

**Anexo 9: Afectaciones de la sobrepresión sobre las estructuras.**

<b>Sobrepresión (psi)</b>	<b>Daño</b>
<b>0.005</b>	Se escucha un sonido que denota la ocurrencia de un suceso inusual.
<b>0.02</b>	Ruido molesto
<b>0.03</b>	Rotura ocasional de ventanas de vidrio bajo tensión.
<b>0.04</b>	Ruido fuerte
<b>0.10</b>	Rotura de ventanas pequeñas bajo tensión.
<b>0.15</b>	Presión típica de rotura de cristales
<b>0.20</b>	Umbral para la pérdida temporal de la audición
<b>0.30</b>	95% de probabilidad de que no ocurran serios daños.
<b>0.4</b>	Daños estructurales limitados menores como rotura de ventanas, rotura de losas y crujidos de los techos y las paredes.
<b>0.7</b>	Daños menores a la estructura de las casas.
<b>1.0</b>	Demolición parcial de las casas
<b>1.2</b>	40 % de daño en las estructuras
<b>2</b>	Colapso parcial de las paredes y los techos.
<b>3</b>	Edificios con marcos de acero torcidos y empujados fuera de sus lugares.
<b>3.3</b>	80 % de daños en las estructuras
<b>3-4</b>	Ruptura de los tanques de almacenamiento de combustibles.
<b>5</b>	Rotura de postes de electricidad y teléfono.
<b>5-7</b>	Destrucción completa de las estructuras cercanas
<b>7</b>	Se vuelcan los carros de tren cargados
<b>10</b>	100 % de daños

**Fuente:** Wells, (2003).

**Anexo 10: Comportamiento de las variables climatológicas para la zona objeto de estudio en la década 2000-2009.**

**Tabla 10a: Comportamiento de los valores medio de la nubosidad para el periodo estudiado.**

<b>AÑO/MES</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
2000	5	4	4	3	3	4	5	4	5	5	4	3
2001	4	4	4	3	3	5	4	4	3	5	4	4
2002	4	3	4	4	3	4	5	5	5	4	4	5
2003	4	5	4	3	4	5	5	4	5	3	5	4
2004	3	5	5	4	5	5	5	5	4	3	5	4
2005	5	4	5	3	4	5	4	5	4	5	5	4
2006	5	4	4	3	4	5	5	5	4	4	5	3
2007	4	5	4	3	5	3	5	4	5	4	4	5
2008	3	3	4	4	5	4	4	3	4	4	4	4
2009	4	4	3	4	5	5	5	5	5	5	5	4
<b>Media</b>	4	4	4	3	4	5	5	5	5	4	5	4
<b>coef.variac</b>	17.9967	17.9967	13.845	15.1882	21.356	15.7135	10.2776	15.891	15.891	18.7812	11.7121	16.6667
<b>desv.estand</b>	0.7378	0.7378	0.5676	0.5163	0.8755	0.7071	0.483	0.6992	0.6992	0.7888	0.527	0.6666

Fuente: Moya, (2010).

## Anexo 10: Continuación.

Tabla 10b: Comportamiento de los valores medio de la temperatura máxima para el periodo estudiado.

AÑO/MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
<b>2000</b>	26	25.7	28	29.6	30.5	30.4	31.3	31.2	30.7	29.2	27.2	26.4
<b>2001</b>	27	26.8	27.5	28.7	30.9	29.7	31.9	30.9	31.6	29	26.5	26.6
<b>2002</b>	26.5	25.7	28	29.9	29.7	30.7	30.8	31.9	30.8	28.5	27.2	26.5
<b>2003</b>	25.4	25.9	28.4	30.3	30.5	30.8	31.9	31.8	29.5	28.8	27.6	27.4
<b>2004</b>	25.5	26.5	28.2	29.3	31.8	29.5	31.5	30.9	30.7	29.5	27.9	27.3
<b>2005</b>	26.7	25.8	28.8	30.9	30.8	31.8	30.9	31.8	31.7	30.5	26.6	25.8
<b>2006</b>	25	27	28.4	28.9	30.9	31.5	31.8	30.9	29.9	30.6	27.5	26.9
<b>2007</b>	26.6	24.5	28	29.2	31.6	29.9	31.6	30.9	30.9	29.8	28.8	27
<b>2008</b>	25.9	25.9	28.1	29.8	30.9	30.5	30.9	30.8	31.9	29.5	26	26.5
<b>2009</b>	26.9	25.4	28.6	30.5	31.8	30.6	31.7	31.9	30.5	30	27.9	25
<b>Media</b>	26.15	25.92	28.2	29.71	30.94	30.54	31.43	31.3	30.82	29.54	27.32	26.54
<b>coef.variac</b>	2.6448	2.7808	1.3056	2.3929	2.1177	2.3972	1.3668	1.5506	2.4842	2.3572	2.9726	2.6949
<b>desv.estand</b>	0.6916	0.7208	0.3681	0.7109	0.6552	0.7321	0.4295	0.4853	0.7656	0.6963	0.8121	0.7152

Fuente: Moya, (2010).

## Anexo 10. Continuación.

Tabla 10c Comportamiento de los valores medio de la temperatura media para el periodo estudiado.

<b>AÑO/MES</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
<b>2000</b>	20.7	20.6	22.6	24.3	25.5	25.8	26.4	26.2	25.6	24.7	22.8	21.3
<b>2001</b>	22.6	21.7	23	25.4	25.8	28	27.4	25	24.8	24.6	22.8	22.7
<b>2002</b>	19.8	19.6	24	25.6	26.6	24.5	27	26.6	26.4	23.5	19.8	20.8
<b>2003</b>	20.1	20.2	22.8	24.9	26.4	24.9	26	25.9	26.6	23.8	22	21.5
<b>2004</b>	19.9	21.2	19.8	22.6	24.8	25.4	26.6	26.9	25.8	25.7	23.8	20.8
<b>2005</b>	19.8	19.7	23.8	25.7	24.3	25.8	25.8	26.7	24.6	25.7	24	19.8
<b>2006</b>	21.2	20.5	22	22.8	26.8	26.5	26.2	25.5	26.8	25.6	23.5	22.6
<b>2007</b>	20.8	21	24.1	23.5	23.9	24.2	25	25.4	23.9	24.9	23.6	19.9
<b>2008</b>	22.4	21.4	19.9	24.6	24.9	25.7	26	26.5	24.9	23.8	20.9	21.6
<b>2009</b>	18.8	19.9	23.6	22.9	25.5	26.8	27	27	25.7	23.9	24.1	20.9
<b>media</b>	20.6	20.5	22.5	24.2	25.4	25.7	26.3	26.1	25.5	24.6	22.7	21.2
<b>coef.variac</b>	5.8109	3.5618	6.9811	4.9603	3.8464	4.3965	2.6557	2.6354	3.7117	3.4507	6.3009	4.5940
<b>desv.estand</b>	1.1361	0.6958	1.4942	1.1402	0.9288	1.0745	0.6637	0.6546	0.8982	0.806	1.3587	0.9235

Fuente: Moya, (2010).

## Anexo 10. Continuación.

Tabla 10d: Comportamiento de los valores medio de la temperatura mínima para el periodo estudiado.

<b>AÑO/MES</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
<b>2000</b>	15.6	15.5	17	18.5	20.6	21.7	21.8	21.7	21.6	20.7	18.6	16.5
<b>2001</b>	16.2	16.2	16.8	18.4	19.5	22.2	23.5	22.5	21.8	19.3	18.7	16.6
<b>2002</b>	16.1	16.1	18.5	18.5	21.3	22.5	22.5	21.7	21.6	21.3	18.4	17.2
<b>2003</b>	15.8	15.5	17	18.5	20.1	21.6	23.1	20.8	21.7	20.1	19.5	16.5
<b>2004</b>	15.9	15.4	16.6	19.5	20.3	21.7	20.9	21.9	20.8	20.5	19.3	15.8
<b>2005</b>	15.3	14.8	17.3	17.8	21.7	20.9	21.7	22	22.5	21.5	17.6	15.9
<b>2006</b>	14.9	15.4	16.8	17.9	19.8	20.8	20.8	22.8	21.9	20.9	18.5	17.2
<b>2007</b>	15.6	15.9	17.1	18.9	21.6	22.8	21	20.9	20.9	21.4	18.9	16.6
<b>2008</b>	15.8	16	17.5	19.2	21.5	21.9	21.9	21.6	22.5	21.7	19.5	16.7
<b>2009</b>	16	15.2	16.9	18.8	20.5	22	22	22.2	21.8	20.6	18.2	17
<b>media</b>	15.7	15.6	17.1	18.6	20.7	21.8	21.9	21.8	21.7	20.8	18.7	16.6
<b>coef.variac</b>	2.487	2.834	3.149	2.833	3.822	2.887	4.146	2.887	2.573	3.511	3.222	2.868
<b>desv.estand</b>	0.391	0.4422	0.5400	0.5270	0.790	0.6297	0.9089	0.6297	0.5586	0.7302	0.6033	0.4760

Fuente: Moya, (2010).

## Anexo 10. Continuación.

Tabla 10e Comportamiento de los valores medio de la humedad relativa para el periodo estudiado.

<b>AÑO/MES</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
<b>2000</b>	<b>78</b>	<b>75</b>	<b>74</b>	<b>73</b>	<b>78</b>	<b>83</b>	<b>81</b>	<b>82</b>	<b>84</b>	<b>84</b>	<b>81</b>	<b>79</b>
<b>2001</b>	79	74	74	74	77	84	79	83	83	84	82	78
<b>2002</b>	78	76	74	72	78	83	80	81	83	83	81	80
<b>2003</b>	79	74	75	74	79	82	83	83	84	84	82	79
<b>2004</b>	77	75	73	73	77	82	81	83	85	85	81	78
<b>2005</b>	78	75	74	73	78	84	82	82	83	83	83	80
<b>2006</b>	78	76	75	72	79	83	81	81	84	83	80	80
<b>2007</b>	78	75	73	74	79	83	82	82	84	85	79	78
<b>2008</b>	76	74	73	72	78	82	81	81	85	85	80	79
<b>2009</b>	79	76	75	73	77	84	80	82	85	84	81	79
<b>Media</b>	78	75	74	73	78	83	81	82	84	84	81	79
<b>coef.variac</b>	1.2087	1.0886	1.1033	1.1184	1.0467	0.9837	1.4255	0.9957	0.972	0.972	1.4255	1.0335
<b>desv.estand</b>	0.9448	0.8164	0.8164	0.8164	0.8164	0.8164	1.1547	0.8164	0.8164	0.8164	1.1547	0.8164

Fuente: Moya, (2010).

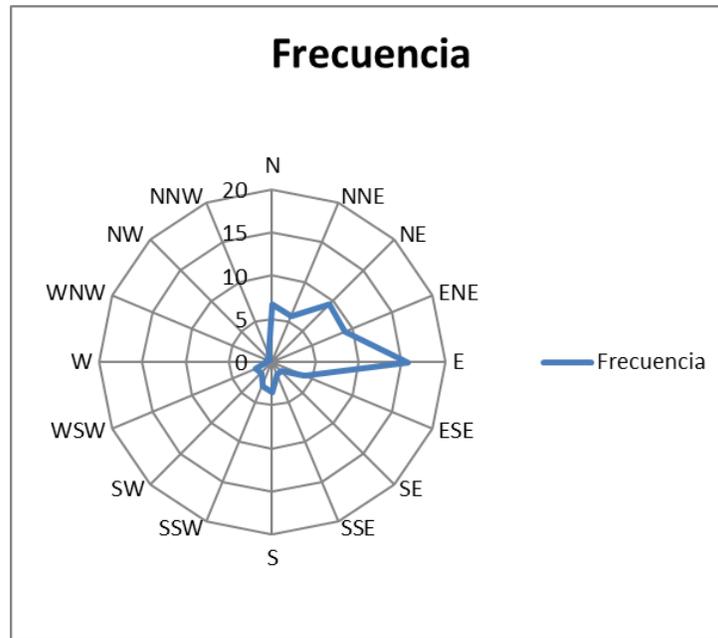
## Anexo 10. Continuación.

**Tabla 10f: Comportamiento de los valores medio de la velocidad y frecuencia de ocurrencia de los vientos para la década 2000 - 2009.**

Rumbos	Frecuencia (%)	Velocidad media (m/s)
N	6.7	3,47
NNE	5.8	4,08
NE	9.4	4,17
ENE	9.1	4,69
E	15.7	4,28
ESE	4	3,97
SE	1.5	3,53
SSE	1.5	3,03
S	3.5	2,94
SSW	3	2,78
SW	1.8	2,42
WSW	2.1	2,33
WSW	0.7	2,75
WNW	0.7	3,33
NW	0.4	3,47
NNW	1.1	3,72
Calma	33	≤ 1

Fuente: Moya, (2010).

**Fig. 10a: Comportamiento de las frecuencias en las distintas direcciones del viento.**



**Fuente:** Elaboración propia.

**Anexo 11: Localización de las áreas afectadas por la VCE originada en la SES.**



**Leyenda**

- 1- Oficinas de Segunda Etapa de Separación.
- 2- Bombas de Nafta.
- 3- Bombas de Residuales.
- 4- Bombas de Tanque 6.
- 5- Bombas Magistrales.
- 6- Comedor.
- 7- Compresor.
- 8- Contenedores de CDC.
- 9- Intercambiadores de Calor en espiral.
- 10-Separadores de Arrastre.
- 11-Separadores Horizontales.

**Anexo 12: Localización de las áreas afectadas por la VCE originada en el almacén de nafta.**



**Leyenda**

- 1- Tanque 101.
- 2- Tanque 102.
- 3- Tanque 103.
- 4- Tanque 104.
- 5- Almacén de Nafta (4 tanques de 205 m<sup>3</sup>).
- 6- Bombas de Nafta (4).
- 7- Área de Bombas Magistrales.
- 8- Oficina de Jefe de Turno.
- 9- Sistema Contra Incendios de la ECO.
- 10-Compresor.
- 11-Intercambiadores de Calor de coraza y tubos.