

UNIVERSIDAD DE MATANZAS
Facultad de Ciencias Técnicas
Departamento de Química



*Análisis de riesgos en el área de almacenamiento de gas licuado del
petróleo en la UEB División Territorial de Comercialización de
Combustibles Matanzas y su entorno*

**TRABAJO DE DIPLOMA
EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO**

AUTORA: *Eleanys Guillén García*

TUTORES: *MSc. Santiago Díaz Suárez.*

Ing. Lisbett Naranjo Delgado.

Matanzas, 2020

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD.

Yo, Eleanys Guillén García, declaro que soy el único autor de este Trabajo de Diploma y lo pongo a disposición de la Empresa Comercializadora de Combustible Matanzas (ECCM) y de la Universidad de Matanzas, para hacer uso del mismo con el objetivo y finalidad que se estime conveniente.

Eleanys Guillén García

"A los revolucionarios más jóvenes, especialmente, recomiendo exigencia máxima y disciplina férrea. Sed de saber, constancia, ejercicios físicos y también mentales".

Fidel Castro.

DEDICATORIA

A mis padres, lo más grande en este mundo.

A mi familia.

A mis amigos.

A Eduardo.

AGRADECIMIENTOS

A la mejor y más hermosa madre del mundo, que siempre con su apoyo, amor, cariño, preocupación y llamadas constantes, me han ayudado a seguir adelante, tu eres mi mayor regalo y mi más grande bendición, eres mi mayor inspiración de vida.

Papá tu eres el amor de mi vida, siempre con las palabras correctas en el momento oportuno. Nunca me dices no, siempre estas para mí, me has enseñado como ser la mejor persona.

Agradezco a mis familiares, que nunca faltó la pregunta ¿cómo salistes en la prueba?.

Abuela tú con tus oraciones siempre preocupada y segura de que yo si podía con todo y tú Abuelo, que gracias a tí nunca me faltaron los platanitos de cada lunes, y cuando llegaba el viernes la pregunta de siempre, ¿Nani cómo te fue en la semana?.

Mis tres tios Alina, Sara y Gilbe, ustedes siempre orgullosos de mí.

Eve y Luisito gracias a ustedes me adapté a mi vida de universitaria, los quiero mucho. Ayma tu siempre pendiente de tu sobrina, mis primotes bellos dando mucho cariño y siempre celosos, y cuando los menciono a ustedes no puede faltar Alfre (el mejor bailarín), siempre aconsejando que hay que continuar y estudiar.

Mis amigas, nunca me faltó lugar para quedarme y un Eli tranquila vamos a salir bien. Las quiero muchos a todas. Mey aquí estas tú también, que siempre serás mi mejor amiga.

Eduardo que puedo decirte a ti!!!. Finalmente vas a escuchar lo que siempre has querido: Si no fuera por ti!!. Me has entendido y apoyado, hasta cuando estaba en pruebas, que eso es muy grande e incluso insoportable jaj. Eres una de las personas más importantes para mí.

Agradezco a mis tutores Santiago y Lisbet, por su valioso tiempo invertido, por la dedicación y el apoyo. Siempre supe que a su lado mi tesis estaba segura, a tiempo y sobre todo perfecta. Vilma para mi eres la tercera tutora, gracias por la comprensión y tus horas de wifi.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se realiza en la Unidad Empresarial de Base (UEB) División Territorial de Comercialización de Combustibles Matanzas, el mismo tiene como fin determinar las afectaciones sociales y económicas que se originan ante accidentes químicos como escapes, incendios y explosiones, bajo las condiciones climatológicas de la zona objeto de estudio. A partir de los registros históricos de accidentes reportados en diferentes partes del mundo y del árbol de sucesos, se determina que el escenario de riesgos más probable es: *Jet Fire*. Se definen además, a través del *software* ALOHA, que los escenarios de mayor peligro para la población son: BLEVE y nube tóxica. El impacto económico más significativo en la planta, lo provoca: un BLEVE, que origina una afectación económica por concepto de reposición total de equipos de: \$ 11 727 444.

ABSTRACT

The present research is carried out in the base business unit (EUB, in Spanish) fuels territorial division of commercialization of Matanzas fuels, the purpose of which is to determine the social and economic effects that arise from chemical accidents such as leaks, fires and explosions, under the climatological conditions of the area under study. From the historical records of accidents reported in different parts of the world and the event tree, it is determined that the most probable risk scenario is Jet Fire. They are also defined, through ALOHA *software* that the scenarios of greatest danger to the population are BLEVE and toxic cloud. The most significant economic impact on the plant is caused by a BLEVE, which causes an economic impact due to the total replacement of equipment of \$11 727 444.

TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
1.1 Gas Licuado. Propiedades y características	3
1.2 Tipos de riesgos que más se producen y frecuencia en instalaciones de gas licuado	5
1.2.1 Incendios	7
1.2.2 Fuego de chorro o llamarada (<i>Jet fire</i>).....	7
1.2.3 BLEVE y bola de fuego (<i>fireball</i>)	7
1.2.3 Explosiones	9
1.2.4 Charco de fuego	9
1.2.5 Nube tóxica	10
1.3 Análisis de riesgos. Técnicas de análisis más usadas en la industria.....	11
1.3.1 Descripción de las técnicas de análisis	13
1.4 <i>Software</i> que son utilizados para estimar áreas de atmósferas peligrosas	22
1.5 Métodos para la determinación del efecto de la radiación y la sobrepresión sobre las personas	25
1.6 Variables climatológicas en la zona de estudio	26
CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS	29
2.1 Caracterización de la planta de gas licuado del petróleo	29
2.2 Determinación toxicológica de la sustancia a tratar, gas licuado	30
2.3 Metodología de elaboración y análisis del árbol de sucesos.....	33
2.4 Desarrollo de las características y particularidades sobre el <i>software</i> de evaluación de áreas de atmósferas peligrosas (ALOHA).....	34
2.5 Metodología para la determinación del efecto de la radiación y la sobrepresión sobre las personas y las edificaciones	37
2.5.1 Método <i>Probit</i> de vulnerabilidad a explosiones e incendios	37
2.5.2 Vulnerabilidad a radiaciones térmicas	38
CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	40
3.1 Análisis del Árbol de Sucesos.....	40
3.2 Establecimiento de las condiciones de trabajo con el <i>software</i>	43
3.3 Resultados de la aplicación del <i>software</i> ALOHA	44
3.3.1 Análisis de los resultados de la explosión de la nube de vapor	44

3.3.2 Análisis de los resultados de las áreas de atmósferas peligrosas originadas por un <i>Jet Fire</i>	46
3.3.3 Análisis de los resultados de las áreas de atmósferas peligrosas originadas por un BLEVE.....	49
3.4 Análisis de la influencia de la sobrepresión y la radiación térmica provocada por la explosión de una nube de vapor, un BLEVE y un <i>Jet Fire</i> sobre las personas y la planta	50
3.4.1 Análisis de los resultados de las áreas de la nube de tóxica de GLP.....	50
3.4.2 Análisis de la influencia de la concentración de una nube explosiva, con respecto a la planta de GLP	55
3.4.3 Análisis de la influencia de la radiación creada por un BLEVE.....	56
3.5 Tipos de afectaciones personales provocadas por los diferentes escenarios	58
3.5.1 Afectaciones obtenidos por <i>Probit</i> para el escenario nube tóxica en la dirección del viento ENE.....	59
3.5.2 Afectaciones obtenidos por <i>Probit</i> para el escenario nube explosiva en la dirección del viento ENE.....	59
3.6 Estimación del impacto económico sobre la planta	61
CONCLUSIONES	62
RECOMENDACIONES.....	63
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64
ANEXOS	69

INTRODUCCIÓN

La industria moderna se caracteriza por un continuo crecimiento de la potencia unitaria de sus instalaciones, con el objetivo de alcanzar mejores rendimientos. Independientemente del desarrollo científico – técnico. El aumento del grado de complejidad de los procesos tecnológicos genera condiciones de riesgos en la sociedad y el medio natural que actúa como soporte de la misma (Costa, 2019).

De igual manera, el avance tecnológico experimentado por la industria química ha llevado consigo una notable mejora en el nivel de vida. Sin embargo, la proliferación de instalaciones industriales y el transporte de determinados materiales, han implicado asimismo la aparición de nuevos riesgos, tales como incendios y explosiones que pueden originar accidentes graves con un fuerte impacto sobre la población y su entorno. Esta situación hace patente la necesidad de dedicar mayores esfuerzos a la reducción de los mismos a un nivel tolerable, compatible con los objetivos de desarrollo sostenible actualmente perseguidos (González *et al.*, 2010).

Sólo aquello que es conocido puede ser controlado. Hemos de ser capaces, por tanto, de identificar las situaciones de peligro y evaluar el riesgo asociado (Casal *et al.*, 2002 y Hahnemann *et al.*, 2017).

En las últimas décadas el número de accidentes que se encuentran directamente relacionados con el gas licuado en instalaciones industriales, han causado grandes daños, tanto económicos como humanos. Es por ello que el tema de la prevención de desastres ha tomado gran relevancia y es indispensable establecer estrategias y programas de largo alcance enfocados a prevenir y reducir sus efectos por lo que es necesario transitar de un esquema fundamentalmente reactivo a uno de carácter preventivo.

En Cuba, y en especial en la industria del petróleo, se opera de la forma más segura posible. La UEB División Territorial de Comercialización de Combustibles Matanzas, ubicada al noroeste de la bahía en el kilómetro 8 de la carretera de la zona industrial, tiene como principal función entregar y recibir los diferentes tipos de hidrocarburos por la vía marítima, oleoductos y transporte terrestre, ya sea para uso provincial o nacional. Sin embargo, como toda instalación de este tipo, se encuentra expuesta a riesgos químicos, por lo tanto ha sido objeto de estudio en los últimos años por parte de profesores y estudiantes de la Universidad de Matanzas. Estas investigaciones han estado orientadas a la determinación de los posibles escenarios de riesgos que pueden surgir ante un escape de sustancias químicas, sus consecuencias y la forma de mitigarlos.

Todas las investigaciones realizadas hasta la fecha han estado dirigidas principalmente a los daños que ocurren en las propias empresas y a su entorno más cercano, por lo que se pretende ampliar el conocimiento sobre las posibles afectaciones a los consejos populares, por lo que se presenta como problema:

¿Cómo evaluar la afectación social y económica que se puede originar por accidentes de escape, incendios y explosión en la zona de almacenamiento de gas licuado del petróleo ubicado en la UEB División Territorial de Comercialización de Combustibles Matanzas?

Para darle solución a este problema se plantea la hipótesis siguiente:

Si se desarrollan técnicas de riesgo para la evaluación de accidentes químicos, se puede determinar la probabilidad de ocurrencia de diferentes escenarios de riesgo y las afectaciones socioeconómicas en la zona de estudio.

Para dar cumplimiento a la hipótesis se plantea el siguiente objetivo general:

Determinar las afectaciones sociales y económicas, que se originan ante accidentes químicos bajo las condiciones climatológicas de la zona objeto de estudio.

Objetivos Específicos:

- Definir la frecuencia de ocurrencia de los escenarios de incendio y explosión que pueden afectar a la zona investigada.
- Determinar el área de afectación para cada escenario de riesgo bajo las condiciones climatológicas seleccionadas.
- Evaluar los niveles de riesgo de las áreas de atmósferas peligrosas asociadas a cada escenario.
- Cuantificar las afectaciones de los escenarios más riesgosos en el área de estudio.

CAPÍTULO 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Para el avance y desarrollo de esta investigación en primer lugar se analizan las características de las sustancias de interés y los principales riesgos que se producen en las industrias petroquímicas. Se comentan los criterios de diferentes especialistas, para el análisis y evaluación de riesgos, que permiten obtener la frecuencia de estos en instalaciones de gas licuado, se estudian los principales *software* que son utilizados para estimar áreas de atmósferas peligrosas, así como los métodos para evaluar los daños.

1.1 Gas Licuado. Propiedades y características

Según Ricardo y Cañas (2018), el gas licuado del petróleo (GLP) tiene dos orígenes: el 60 % de la producción se obtiene durante la extracción de gas natural y petróleo del suelo. El 40 % restante se produce durante la refinación de crudo de petróleo. Es, por tanto un producto secundario que existe de forma natural. En el pasado, el GLP se destruía por venteo o quema en antorcha (era un producto indeseable). Con ello, se desperdiciaba el enorme potencial de esta fuente de energía excepcional.

Aunque el GLP está asociado a la producción de gas natural y crudo de petróleo, lo cierto es que tiene sus ventajas, características y puede desempeñar prácticamente cualquiera de las funciones de los combustibles primarios de los que se deriva.

El Gas Licuado de Petróleo es un hidrocarburo compuesto esencialmente por propano y butano, que en condiciones de presión y temperatura ambientales (aproximadamente 1 atm y 20 °C), se encuentra en estado gaseoso. Para tener GLP en estado líquido a la presión atmosférica, la temperatura debe ser inferior, en caso de tratarse de propano, a - 42.2 °C. A temperatura ambiente, puede ser licuado si se le somete a una presión moderadamente alta, del orden de unas 8 atm. La densidad y presión de vapor varían según su composición. Su peso molecular es mayor que el del aire, por lo que en estado gaseoso es más pesado que éste y, por ello, en caso de escape se comporta como un gas pesado y tiende a ubicarse en lugares bajos.

Dado que el GLP en estado gaseoso es un componente con menor presión de vapor y puntos de ebullición más altos que el gas natural, antes de transportar dicho gas se somete a una destilación fraccionada. Mediante esta operación se separa el gas natural del resto de hidrocarburos con los que inicialmente se encuentra mezclado; de estos hidrocarburos se obtiene el GLP (Villafañe, 2013).

El GLP combinado con el aire en una proporción menor a diez por ciento es inflamable, combustiona rápido y no emite residuos contaminantes como plomo o azufre. Es inodoro e incoloro, por lo que se le debe agregar una proporción del agente odorante llamado mercaptano. No es tóxico ni venenoso, pero en grandes proporciones en el aire puede causar la muerte por asfixia y, en estado líquido, quemaduras en la piel. Presenta ventajas económicas con respecto a su rendimiento en comparación a otros combustibles (Vásquez, 2015).

El GLP, es una fuente energética que conjuga versatilidad, eficiencia y compatibilidad ambiental. En climas cálidos la composición de propano-butano es muy utilizada como combustible para uso doméstico. Debido a la propiedad de mejor evaporación, el propano es el componente gaseoso preferido por la industria, donde se requiere una alta capacidad de calor y evaporación rápida.

El uso principal del GLP como combustible doméstico y comercial es en la cocción de alimentos. Además, este producto se usa en la industria en cualquier equipo que requiera un combustible limpio y fácilmente controlable: hornos para tratamientos de metales, vidrio, cerámica, planchado de ropa, purificación de gases, endurecimiento de metales, pasterización, y cortes de metales, quemándose totalmente sin producir humo, cenizas u hollín, si se le usa adecuadamente (Leiva, 2017).

Según Venegas y Ayabaca (2019), el GLP es un combustible que se utiliza como fuente de energía para aplicaciones residenciales, comerciales e industriales. Su uso tiene varias ventajas entre las que se pueden mencionar:

- Satisface varias necesidades energéticas como una única fuente.
- Es fácil de transportarlo y almacenarlo cuando su temperatura disminuye y aumenta su presión.
- No es tóxico para el ser humano.

A pesar de todos estos beneficios reportados sobre el manejo del GLP, existen varias desventajas en su utilización, tales como:

- Crea en el usuario exceso de confianza en su manipulación. Esto ha ocasionado accidentes con graves consecuencias tanto físicas como humanas.
- Falta de previsión en el diseño de nuevas edificaciones por parte de los constructores hace que los recipientes (cilindros) deban ser almacenados en lugares sin ventilación y apilados uno encima de otro, lo cual ocasiona inseguridad para el usuario.

El GLP en condiciones ambientales se encuentra en fase vapor, obtenido de un proceso de refinación del petróleo, es llevado a fase líquida mediante el aumento de su presión y la disminución de su temperatura para ser almacenado en grandes recipientes, desde los cuales es transportado a plantas de envasado o entregado a los usuarios finales. La entrega se realiza en recipientes denominados cilindros que son fácilmente manipulables y se los recambia cuando se termina el combustible, o tanques si son instalados de manera permanentemente, para su recarga se requiere de un camión cisterna (Venegas y Ayabaca, 2019).

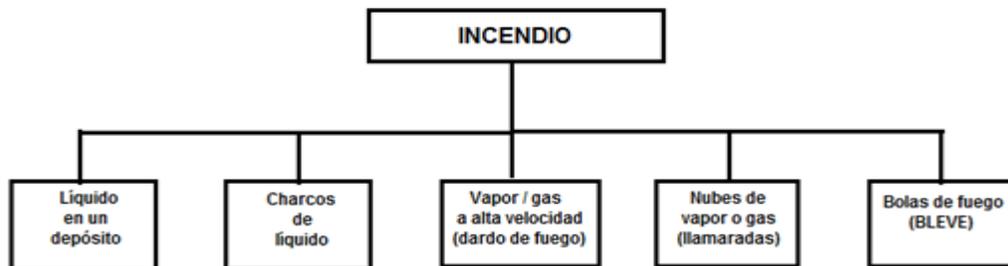
El GLP puede ocasionar irritación en contacto con la piel y ojos. Es altamente inflamable y su combustión es muy rápida, lo que causa altas temperaturas. Tiene unos límites inferior y superior de inflamabilidad para el propano del 2,3 % y 9,6 % (en volumen) de gas en aire, respectivamente, y para el butano de 1,9 y 8,6 % de gas en aire.

Los peligros potenciales de la fuga de GLP son diversos y varían en dependencia de varios factores: el tamaño del derrame, las condiciones de almacenamiento, las condiciones ambientales y las características del lugar en el cual se produce el derrame.

Uno de los aspectos más peligrosos de una fuga de GLP es la formación de nubes inflamables, que pueden producir una explosión y, simultáneamente, un incendio de llamarada (Villafañe, 2013).

1.2 Tipos de riesgos que más se producen y frecuencia en instalaciones de gas licuado

Según Ferrero (2018), los efectos de un incendio pueden ser temibles, ya que la radiación térmica desprendida puede afectar a otras partes de una planta, lo que causa situaciones accidentales de mayor alcance, como explosiones u otros escapes e incendios. Las diferentes posibilidades de incendio se presentan en la figura 1.1.



Fuente: Ferrero (2018).

Figura 1.1: Distintas posibilidades de accidentes graves con fuego.

Según Zepeda y González (2014), se conocen tres tipos de incendio, determinados básicamente por los combustibles involucrados.

- Incendio de copa, de corona o aéreo. Estos incendios se propagan por la parte alta de los árboles (copas) causándoles la muerte, lo que afecta gravemente a los ecosistemas, pues destruyen toda la vegetación y en grados diversos dañan a la fauna silvestre.
- Incendio superficial. Daña principalmente pastizales y vegetación herbácea que se encuentre entre la superficie terrestre y hasta 1,5 m de altura.
- Incendio subterráneo. Se propaga bajo la superficie del terreno, a través de las raíces y la materia orgánica acumulada en grandes afloramientos de roca. Se caracteriza por no generar llamas y poco humo.

Según Reche (2016), la principal magnitud peligrosa de los incendios es la radiación térmica, aunque se debe destacar que pueden producirse otros fenómenos peligrosos, como la generación de sustancias tóxicas, ondas de presión o formación de proyectiles, que en algunos casos pueden tener niveles de gravedad mayores que el precursor, que deben evaluarse independientemente de éste.

Los incendios se clasifican en cuatro tipos en función del estado físico de los productos que los originan y del momento en que se aporta la energía de activación. Se aprecia en la siguiente **tabla 1.1** un resumen de las características citadas.

Tabla 1.1: Clasificación de tipos de incendios.

Tipos de incendios		
Denominación	Estado físico de producto	Ignición
Incendio de charco o depósito	Líquido	Inmediata o diferida
Bola de fuego	Gas o líquido	Inmediata
Dardo de fuego	Gas o líquido	Inmediata o diferida
Incendio flash	Gas	Diferida

Fuente: Reche, (2016).

1.2.1 Incendios

Diversos análisis históricos han demostrado que los incendios son el tipo más frecuente de accidente, seguido de explosiones y nubes de gas.

En un incendio, se libera energía térmica porque se quema un combustible. La combustión es una reacción química exotérmica en la que una sustancia se combina con un oxidante, comúnmente oxígeno.

El combustible puede ser sólido, pero la mayoría de los incendios en la industria de procesos involucran líquidos o gases. Para que se produzca la combustión, se requieren tres elementos: combustible, comburente y foco de ignición, estos tres elementos pueden ser representados por el triángulo de fuego, si un lado falta, la combustión es imposible; si los tres lados están conectados, es posible la combustión. También se requiere otro elemento: la aparición de una reacción química. Sin esta reacción química, por ejemplo, debido a la presencia de un balón extintor, el fuego no es posible. Por lo tanto, el triángulo de fuego evoluciona hacia un tetraedro de fuego.

1.2.2 Fuego de chorro o llamarada (*Jet fire*)

Los fuegos de chorro o llamarada se caracterizan por llamas de difusión altamente turbulentas. Pueden ocurrir debido a la liberación accidental de un gas combustible, por ejemplo, a través de una tubería rota o una brida, o de una válvula de alivio, o en proceso. Incendios accidentales en plantas de proceso o en accidentes de transporte, a menudo, afectan el equipo; en este caso, se producen grandes flujos de calor debido a la alta transferencia de calor por convección causada por relativamente buena combustión, y altas velocidades de flujo (Casal, 2008).

En un *jet fire* no hay retroalimentación de la llama y, por lo tanto, la cantidad de gas que sustenta la llama depende únicamente de las características de la fuga, es decir, del tipo de combustible y del caudal de salida (Ferrero, 2018).

1.2.3 BLEVE y bola de fuego (*fireball*)

Las sustancias que pueden conducir a una BLEVE (propano, butano, agua, etc.) son relativamente comunes en la industria y generalmente se transportan en automóvil o ferrocarril, lo que significa que BLEVE ocurre con cierta frecuencia (Casal, 2008).

Un BLEVE es un tipo de explosión mecánica cuyo nombre procede de sus iniciales en inglés, (*Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion*) cuya traducción sería "expansión explosiva del vapor de un líquido en ebullición".

El 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. Para que se produzca una explosión BLEVE no es necesaria la existencia de reacciones químicas ni fenómenos de combustión. Podría producirse incluso en calentadores de agua y calderas de vapor. En principio podría originarse en cualquier líquido almacenado, en un recipiente hermético, aunque hay explosiones que pueden confundirse con una BLEVE sin serlo. Los BLEVE son exclusivos de los líquidos o gases licuados en determinadas condiciones.

Normalmente los BLEVE se originan por un incendio externo que incide sobre la superficie de un recipiente a presión, especialmente por encima del nivel líquido, lo que debilita su resistencia y termina en una rotura repentina del mismo, dando lugar a un escape súbito del contenido, que cambia masivamente al estado de vapor, el cual si es inflamable da lugar a la conocida bola de fuego (*fireball*). Esta última se forma por deflagración (combustión rápida) de la masa de vapor liberada. Debido a que esta circunstancia es el escenario normal, al hablar de explosiones BLEVE y sus consecuencias, se incluye en sentido amplio a la bola de fuego, aunque debe quedar claro que ésta última sólo ocurre cuando el producto es inflamable. La característica fundamental de una BLEVE es la expansión explosiva de toda la masa de líquido evaporada súbitamente, lo que aumenta su volumen más de 200 veces. La gran energía desarrollada en esa explosión repentina proyecta fragmentos rotos de distintos tamaños del recipiente a considerables distancias. Precisamente, ésta es una prueba de confirmación de un BLEVE (Bestratén y Turmo, 2019).

El BLEVE es un accidente que sucede con cierta periodicidad. El origen puede ser diverso, pero una de las causas más frecuentes es la acción del fuego sobre un recipiente (Casal *et al.*, 2001; Wells, 2003).

Por su parte Reche (2016), asegura que bola de fuego es un tipo de incendio característico de los almacenamientos de gases inflamables licuados afectados por un incendio exterior, que produce el aumento de la presión interna y, al superar la de rotura del recipiente, provoca su estallido. La expansión brusca del contenido produce la vaporización de una parte del líquido (flash), lo que forma una nube de gas y aerosol. La formación y evolución de la nube de gas inflamable es decisiva para la generación y el desarrollo de la bola de fuego. Su mecanismo de formación ha sido descrito mediante

dos modelos. El primero, propuesto por Hardee y Lee (1975), está basado en la conservación de la cantidad de movimiento inicial de la fuga y el segundo, propuesto por Maurer (1977), está condicionado por un proceso de difusión turbulenta y describe mejor el proceso de mezcla en la nube.

Para que se produzca una bola de fuego, la fuente de ignición debe encontrarse cerca del punto donde se genera la fuga. Si el accidente primario es el incendio exterior, la bola de fuego se inicia de forma inmediata.

1.2.4 Explosiones

La característica principal que define a una explosión es la generación de una onda de presión debida a la liberación de energía extremadamente rápida que se propaga en todas las direcciones (Reche, 2016).

Según Castro (2019), en una explosión se produce una gran cantidad de energía en un espacio de tiempo muy corto. Existen dos principales clases de explosiones:

- Explosión física: en la que la energía necesaria para que se produzca procede de un fenómeno físico. El caso típico es la liberación súbita de la energía presente en un gas comprimido. Es necesario que la sustancia se encuentre en un recipiente hermético.
- Explosión química: en la que la energía procede de una reacción química y no es necesario que esté confinada. Las consecuencias inmediatas de una explosión son, por un lado, la generación de ondas de presión que crean compresiones y expansiones alternativas del aire y, por otro lado, la formación de objetos acelerados que actúan como proyectiles.

1.2.5 Charco de fuego

Charcos de fuego al aire libre:

Según Casal (2002), 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 esparcirá hasta que encuentre una barrera o hasta que se consuma todo el combustible en el incendio. En caso de un escape continuo, el charco crecerá hasta que la velocidad de combustión se iguale al caudal de vertido. De este modo se llega a un diámetro de equilibrio, que se mantiene mientras no se detiene la fuga. Por otra parte, 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.

Charcos de fuego sobre el mar:

No es difícil encontrar un escenario de este tipo, sólo hay que ver el número de accidentes ocurridos en barcos petroleros o plataformas petrolíferas. En todos estos casos, cuando se produce un vertido accidental el resultado es una mancha de combustible en la superficie del mar.

Esta mancha puede prender inmediatamente o al cabo de cierto tiempo, dependerá de las condiciones del entorno. En este último caso hay que tener en cuenta que, a medida que el tiempo pasa, el diámetro de la mancha crecerá mientras su grosor va disminuyendo. Se puede alcanzar de este modo un valor mínimo (que según los estudios se encuentra alrededor de 1,25 mm), en el que la ignición no es posible, aunque exista una fuente de ignición. También hay que tener en cuenta la temperatura del combustible, si no está por encima de la temperatura de inflamación, las posibilidades de que se produzca la ignición serán mínimas. En cualquier caso, de producirse la ignición, el combustible tiende a quemarse hasta que el grosor de la mancha se hace tan pequeño que, al ser tanto el calor que se pierde en el agua, el calor restante no puede evaporar el combustible suficiente como para alimentar la llama. Experimentalmente se ha observado que este grosor se encuentra alrededor de 0,8 mm. Normalmente, lo que sucede es que la mancha se rompe y forma otras manchas más pequeñas que aún pueden arder.

1.2.6 Nube tóxica

Se forma una nube de vapor debido a la pérdida de contención de cierta masa de un material inflamable vaporización de líquidos o gases. Esto puede ser un derrame de líquido que luego se evapora de una piscina, una liberación de gas o vapor, o una pérdida de contención de un líquido sobrecalentado que, bajo despresurización, se somete a una vaporización instantánea que produce una liberación bifásica (pulverización). Bajo ciertas condiciones meteorológicas, se puede formar una nube inflamable. Si la nube se enciende, la sustancia arderá y se producirá un incendio repentino. Es posible que, además del fuego, también tenga lugar una explosión mecánica (Casal *et al.*, 2008).

1.3 Análisis de riesgos. Técnicas de análisis más usadas en la industria

Según Albernas (2015), para conseguir que una instalación industrial opere de forma segura y continuada, es fundamental implantar un sistema de gestión de la seguridad (SGS) asociado a sus procesos. Esto se consigue a través de dos actividades, que son las siguientes:

Análisis de los peligros (PHA)

Los estudios y las técnicas PHA (acrónimo de “*Process Hazard Analysis*”, Análisis de los Peligros de un Proceso o cualquier método que permita la identificación y evaluación sistemática de los peligros asociados a un determinado proceso), son una parte importante de todo SGS, y tienen como función fundamental identificar, evaluar y mitigar los peligros potenciales que puedan dañar la seguridad y salud de las personas, causar pérdidas económicas y dañar el medio ambiente. Para el caso específico de la industria química de procesos, dicho análisis se realiza en dos etapas:

- a) Identificación de peligros: Identificar los peligros y los problemas de operación asociados a un proceso industrial. En algunas ocasiones puede ser útil realizar una clasificación de los mismos donde se tendrá en cuenta su peligrosidad.
- b) Evaluación de peligros: Esta evaluación puede ser de dos tipos según Albernas (2015) y Casal *et al.* (2001).

Evaluación cualitativa de las causas y efectos de los accidentes o sucesos provocados por los peligros identificados. Evaluación cuantitativa de los escenarios de accidente importantes, con el objetivo de determinar la probabilidad de que ocurran.

Análisis del riesgo

Por otra parte, el análisis de riesgo sirve de complemento al SGS ya que una vez identificados y analizados los peligros se calcula el riesgo asociado a los accidentes más importantes que pueden provocar, que el Riesgo = (consecuencia del accidente) x (frecuencia con la que ocurre el accidente).

Marhavilas *et al.* (2011) muestra que las técnicas PHA se clasifican, en función de cómo evalúan los peligros y escenarios de accidente identificados, en tres categorías principales: cualitativas, cuantitativas y las técnicas híbridas (cualitativas - cuantitativas, semi-cuantitativas).

Las técnicas cualitativas basan su funcionamiento tanto en los procesos de estimación analítica como en la capacidad o habilidad de los directivos de seguridad (*managers-engineers*). Su utilización está avalada (Marhavilas *et al.*, 2011; Nolan, 2011), por estar presentes en casi todas las etapas del ciclo

de vida de los procesos industriales, además de presentar una frecuencia relativa de uso del 27,68 % con respecto a las demás técnicas (cuantitativas 65,63 % y las híbridas con un 6,7 %).

Marhavidas *et al.* (2011) definen las técnicas cualitativas como aquellas que basan su funcionamiento tanto en los procesos de estimación analítica como en la capacidad o habilidad de los directivos de seguridad, por otra parte en Colectivo de autores (2017), define este tipo de análisis como aquel que brinda un listado de posibles causas y efectos de cada peligro. Una vez analizadas estas definiciones se puede concluir que las técnicas cualitativas deben brindar un listado de posibles causas y/o efectos de cada peligro basado ya sea en la experiencia del equipo de realización del análisis o en procesos de estimación analítica.

A continuación, se muestra, una recopilación de las técnicas cualitativas más usadas.

Las técnicas cualitativas relacionadas en la **Tabla 1.2**, presentan una mayor frecuencia de uso, pero esto no quiere decir que todos los autores coincidan en ello. Según Casal *et al.* (2001), las de mayor utilización son: 1; 2; 3; 5; 8; 9 y 11 mientras que Renau (2013) sólo considera: 1; 2; 9; 11 y 13 por su parte Marhavidas *et al.* (2011) relaciona las técnicas: 1; 2; 5; 7; 8 y 10.

Tabla 1.2: Técnicas cualitativas de análisis de riesgo.

Número	Técnica
1	(HAZOP), Análisis de peligros y operabilidad
2	<i>What if, ¿Qué pasaría si?</i>
3	<i>Preliminary Hazard Analysis (PrHA), Análisis preliminar del peligro, (HAZID)</i>
4	Pre-HAZOP
5	<i>Checklist, Lista de revisión o chequeo</i>
6	<i>What-if/checklist</i>
7	Técnica de pasos.
8	Revisión de seguridad
9	FMEA, Análisis funcional de modos de fallo

	y sus efectos
10	<i>Task analysis</i>
11	Análisis histórico
12	Tormenta de Ideas
13	<i>Relative ranking</i>

Fuente: Renau, (2013).

Según Albernas (2015), las técnicas cualitativas de identificación y valoración de peligros en los procesos químicos industriales presentan las mismas limitaciones que las técnicas cuantitativas e híbridas relacionadas por Ibarra *et al.* (2014), las fundamentales las que a continuación se relacionan:

Plenitud: Nunca puede haber una garantía de que todas las situaciones de accidente, causas y efectos han sido consideradas.

Reproducibilidad: Diferentes expertos, que usan la misma información, pueden generar resultados diferentes cuando analizan el mismo problema.

Subjetividad: La experiencia individual de quien realiza el estudio es utilizada para determinar el grado de importancia de un peligro.

1.3.1 Descripción de las técnicas de análisis

La combinación de las técnicas que a continuación se detallan, son muy efectivas en la evaluación de los diferentes escenarios de riesgos y su probabilidad de ocurrencia.

Las listas de verificación o de chequeo (*Checklist*)

Este tipo de análisis consiste en una evaluación sistemática que toma como base criterios pre-establecidos en forma de una o más listas de comprobación, estas listas no son más que una relación de preguntas sobre el funcionamiento, la organización, mantenimiento y otras áreas de interés desde el punto de vista de la seguridad en la instalación, las listas de chequeo representan un método simple de identificación de peligros. Sus principales características pueden resumirse como sigue:

- Es aplicable a cualquier actividad o sistema, incluido lo relacionado tanto con los equipos como con los factores humanos.

- Se realiza generalmente por una persona capacitada para entender las preguntas de la lista de verificación, o a veces por un pequeño grupo.
- Se basa principalmente en entrevistas, revisión de documentación e inspecciones sobre el terreno.
- Genera listas cualitativas de conformidades y determinaciones de no conformidades con recomendaciones para corregir las no conformidades.
- Se utiliza para el análisis detallado o de alto nivel, incluyendo el análisis de causa raíz.
- Se utiliza con mayor frecuencia para guiar a los equipos de trabajo a través de la inspección de los sistemas de recipientes críticos (Marhavidas *et al.*, 2009; Reniers *et al.*, 2015).

Análisis ¿Qué pasa si?: (*What if?*)

Es un enfoque que usa un interrogatorio amplio y bien estructurado para postular los resultados inesperados que pueden resultar en los accidentes o los problemas de rendimiento de sistema y determina el cómo las cosas pueden salir mal y considera las consecuencias de ello (Reniers *et al.*, 2015).

Según Reniers *et al.* (2015) las principales características de esta técnica se han resumido brevemente como sigue:

Normalmente se conforma por uno o más equipos de diversa formación y experiencia que participan en grupo donde revisan, la documentación y las inspecciones sobre el terreno. Genera descripciones cualitativas de los problemas potenciales, en forma de preguntas y respuestas, así como listas de recomendaciones para prevenir los problemas donde son aplicables a cualquier actividad o sistema. La calidad de la evaluación depende de la eficacia de la documentación, la formación del líder del equipo, y la experiencia de los equipos de revisión. Se utiliza ocasionalmente sola, pero más a menudo se maneja para complementar otras técnicas más estructuradas (especialmente análisis de lista de verificación).

Análisis de tareas: (*Task analysis*)

Según Doytchev y Szwillus (2018), este método analiza la forma en la que el personal realiza sus tareas en su ambiente laboral describe además como los operarios interactúan tanto con el sistema como con los demás miembros de ese sistema. Este método puede ser usado para crear una detallada imagen de la participación del factor humano que utiliza para ello, toda la información necesaria con

un adecuado grado de detalles. El resultado de un análisis de tareas es un modelo de tarea. El proceso de aplicar el análisis de tareas por lo general consta de tres fases:

- La recolección de datos sobre las intervenciones humanas y las demandas del sistema.
- La representación de los datos en un formato comprensible o en un gráfico.
- Comparación entre las demandas del sistema y las capacidades de operador.

El objetivo principal del análisis de tareas es garantizar la compatibilidad entre las demandas del sistema y las capacidades del operador y si es necesario, alterar las demandas del sistema de manera que las tareas se adapten al personal. Este método requiere de mucho tiempo y de la intervención de expertos si las tareas son complejas.

El método de Estudios de riesgo y operabilidad: (*Hazard and operability analysis, HAZOP*)

Es una metodología formal para identificar los problemas de operatividad de procesos con alto nivel de peligro a través del pensamiento imaginativo. La técnica de análisis HAZOP utiliza un proceso sistemático para:

- Identificar las posibles desviaciones de las operaciones normales.
 - Garantizar que las salvaguardas estén en el lugar adecuado para ayudar a prevenir accidentes.
- El principio básico del estudio HAZOP radica en considerar que las amenazas que surjan en una planta sean debido a las desviaciones del comportamiento normal del proceso. En un estudio HAZOP, un grupo de expertos (equipo HAZOP) examina sistemáticamente tanto el proceso como los diagramas de instrumentación y determinan todas las posibles desviaciones del normal funcionamiento, así como las causas anormales y las consecuencias adversas para cada sección de la planta. El equipo HAZOP es un grupo multidisciplinario de expertos de seis miembros, que tienen un amplio conocimiento en el diseño, operación y mantenimiento de las plantas de proceso (Baysari y McIntosh, 2018).

Identificación del peligro asociado a las sustancias

Según Casal *et al.* (2001), el primer paso para una precisión correcta del peligro potencial de una instalación industrial es la identificación y caracterización de las sustancias involucradas en el proceso. Donde los datos de interés son las propiedades de la sustancia o sustancias involucradas en el proceso.

El objetivo de estos datos radica principalmente en el efecto que las condiciones de operación producen sobre las sustancias involucradas, lo que permite eliminar las que sean susceptibles de provocar un accidente.

Para identificar estas relaciones entre sustancias y condiciones de proceso se puede utilizar el sentido común, la experiencia y técnicas más sistemáticas como son las matrices de interacción.

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 (Carol, 2001; Casal *et al.*, 2001).

Vílchez (2016) plantea que este método estudia los accidentes ocurridos en fábricas, procesos, instalaciones u operaciones similares a la que se está analizando. Este estudio le facilita al establecimiento los puntos débiles del sistema.

Carol (2001) cita que el objetivo primordial del análisis histórico es detectar los peligros presentes en una instalación por comparación con otras similares que hayan tenido accidentes registrados en el pasado. Si se analiza estos antecedentes es posible conocer las fuentes de peligro, estimar el alcance posible de los daños e incluso, si la información es suficiente estimar la frecuencia de ocurrencia.

Según Casal *et al.* (2001), 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. A lo cual Carol (2001) añade que es una metodología simple y económica que no compromete muchos recursos materiales o humanos, su gran ventaja es que detecta peligros absolutamente reales que en el pasado se han puesto de manifiesto.

Vílchez (2016), propone esta técnica como método cualitativo de apoyo a otros sistemas de identificación de riesgos, que requieren una mayor dedicación y especialización técnica como HAZOP.

El análisis histórico se lleva a cabo mediante un banco de datos sobre accidentes. Estos bancos, informatizados, permiten una consulta exhaustiva y, sobre todo, muy rápida, de la información

disponible. Esta información, obtenida de una manera directa, debe considerarse complementaria y no substitutoria de la que se obtendrá de un estudio sistemático (Vílchez, 2016).

La recogida de información de un accidente debe constituir una verdadera investigación. El estudio detallado del accidente puede enfocarse, a grandes líneas, de dos formas distintas (Casal *et al.*, 2001):

- Evaluación de la magnitud de las consecuencias: daños a personas, bienes o medio ambiente.
- Establecimiento de la situación que existía con anterioridad al accidente y de la secuencia de sucesos que lo provocaron.

Según Casal *et al.* (2001), el conjunto de estas dos vías de investigación permite elaborar el historial del accidente. La información contenida de una historial resulta de gran utilidad para:

- Detectar medidas técnicas u organizativas para reducir la probabilidad de que se repitan los accidentes.
- Elaborar medidas de protección, internas y externas, que reduzcan las consecuencias probables del eventual accidente.
- Contrastar los modelos de evaluación de efectos y consecuencias.

Casal *et al.* (2001), plantea que el análisis histórico de accidente como todas las técnicas de análisis de riesgos posee sus limitaciones. Algunas de estas 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.
- El análisis histórico no solamente es una técnica identificativa orientada a la búsqueda de información de accidentes industriales ocurridos en el pasado, sino que también nos ayuda a estimar la frecuencia de iniciación del suceso.

Registros históricos de accidentes

La autora de este trabajo considera muy adecuada la técnica del análisis histórico de accidentes, para estimar la frecuencia de iniciación del suceso, aunque se usa un registro histórico de accidentes lo suficientemente amplio.

Díaz (2013) desarrolló su investigación a partir de un registro histórico de accidentes ocurridos entre el año 1917 y 1996. Para el desarrollo de esta investigación se actualiza hasta el año 2006 (**Anexo 1**).

Método del árbol de sucesos.

Según Díaz (2020), el árbol de sucesos o análisis de secuencias de sucesos es un método inductivo que describe la evolución de un suceso iniciador sobre la base de la respuesta de distintos sistemas tecnológicos o condiciones externas.

Según Piqué y Cejalvo (2016), el método de análisis del árbol de sucesos fue concebido y utilizado por vez primera en 1962 por H. A. Watson, de *Bell Telephone Laboratories*, en relación con un contrato de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos de América para evaluar las condiciones de seguridad de los sistemas de tiro de los misiles ICBM Minuteman. A partir de ese momento, esta técnica de análisis de riesgos ha sido profusamente utilizada y perfeccionada por parte de instalaciones nucleares, aeronáuticas y espaciales, extendiéndose después su empleo para la evaluación de riesgos a las industrias electrónica, química, petroquímica, etc.

Descripción del método:

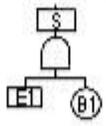
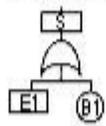
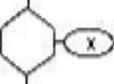
Se trata de un método deductivo de análisis que parte de la previa selección de un "suceso no deseado o evento que se pretende evitar", sea éste un accidente de gran magnitud (explosión, fuga, derrame, etc.) o sea un suceso de menor importancia (fallo de un sistema de cierre, etc.) para averiguar en ambos casos los orígenes de los mismos.

Desarrollo del árbol:

Prefijado el "evento que se pretende evitar" en el sistema a analizar, se desciende escalón a escalón a través de los sucesos inmediatos o sucesos intermedios hasta alcanzar los sucesos básicos o no desarrollados que generan las situaciones que, concatenadas, contribuyen a la aparición del "suceso no deseado".

Para la representación gráfica de los árboles de fallos y con el fin de normalizar y universalizar la representación se han elegido ciertos símbolos que se representan en la **Tabla 1.3**.

Tabla 1.3: Símbolos utilizados para la representación del árbol de sucesos.

SÍMBOLOS	SIGNIFICADO DEL SÍMBOLO
	SUCESO BÁSICO. No requiere de posterior desarrollo al considerarse un suceso de fallo básico.
	SUCESO NO DESARROLLADO. No puede ser considerado como básico, pero sus causas no se desarrollan, sea por falta de información o por su poco interés.
	SUCESO INTERMEDIO. Resultante de la combinación de sucesos más elementales por medio de puertas lógicas. Asimismo se representa en un rectángulo el "suceso no deseado" del que parte todo el árbol.
	<p>PUERTA "Y"</p>  <p>El suceso de salida (S) ocurrirá si, y sólo si ocurren todos los sucesos de entrada (E1 B1).</p>
	<p>PUERTA "O"</p>  <p>El suceso de salida (S) ocurrirá si ocurren uno o más de los sucesos de entrada (E1 B1).</p>
	SÍMBOLO DE TRANSFERENCIA. Indica que el árbol sigue en otro lugar.
	PUERTA "Y" PRIORITARIA. El suceso de salida ocurrirá si, y sólo si todas las entradas ocurren en una secuencia determinada, que normalmente se especifica en una elipse dibujada a la derecha de la puerta.
	PUERTA "O" EXCLUSIVA. El suceso de salida ocurrirá si lo hace una de las entradas, pero no dos o más de ellas.
	PUERTA DE INHIBICIÓN. La salida ocurrirá si, y sólo si lo hace su entrada y además se satisface una condición dada (X).

Fuente: Piqué y Cejalvo, (2016).

El árbol de sucesos es un modelo lógico que matemáticamente y gráficamente retrata la combinación de eventos de fallo y circunstancias en una sucesión de incidentes, expresado como una estimación anual (Nolan, 2011).

Wells (2003) señala que los árboles de sucesos son la mejor herramienta para el análisis de consecuencias. Estos son usados para realizar un análisis probabilístico. El cual se organiza mediante una estructura de árbol en la que cada bifurcación se decide a partir de la ocurrencia de un fenómeno u otro.

Según Bestratén *et al.* (2019), mediante los árboles de sucesos se pretende estructurar la secuencia de eventos básicos que desencadena un tipo de accidente concreto, establece también las probabilidades de ocurrencia si el conocimiento de los sucesos básicos lo permiten. Carol (2001) puntualiza que, desde un punto de vista abstracto, es similar al análisis de árboles de fallos. Sin embargo, los sucesos básicos en este caso no son fallos de los sistemas sino alternativas de las diferentes situaciones que pueden darse.

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. Si se parte 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 (Dirección General de Protección Civil, 1994; Servicio de Protección Civil, 2002).

De esta forma, se obtienen 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 (Dirección General de Protección Civil, 1994; Servicio de Protección Civil, 2002).

Carol (2001) plantea que una vez realizado el análisis se obtiene una representación gráfica en forma de árbol horizontal en la que quedan representadas todas las posibles evoluciones del sistema según se den o no las diferentes alternativas planteadas hasta los sucesos accidentales finales (BLEVE, nube de gas, explosión, dispersión, etc.).

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 evento. 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.

Como se considera que los factores condicionantes son sucesos independientes, cada una de las secuencias, tiene asociada una frecuencia. De esta forma también se cumple que la suma de las frecuencias de todas las secuencias accidentales es igual a la frecuencia del iniciador (Dirección General de Protección Civil A, B y C, 1994; Servicio de Protección Civil, 2002).

Según la Dirección General de Protección Civil (1994) y el Servicio de Protección Civil (2002), la metodología del árbol de sucesos posee las siguientes ventajas y desventajas.

Ventajas:

- Permite un estudio sistemático y exhaustivo de la evolución de un suceso.
- Su aplicación es muy sencilla.

Inconvenientes:

- El valor obtenido está sujeto a incertidumbre por la dificultad que existe normalmente en evaluar las probabilidades de los factores asociados.
- Si el árbol es grande, su tratamiento puede hacerse laborioso.

Carol (2001) hace énfasis en que por su especificidad y grado de desarrollo son aplicables a las mismas instalaciones y bajo las mismas condiciones de los árboles de fallos.

A partir de los estudios de los registros históricos de accidentes Wells (2003) 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 que produce un *Jet Fire*: 0,1.

Probabilidad de que no ocurra ignición inmediata: 0,9.

Razón de explosión de la nube de vapor con clima D5: 1/4.

Razón de explosión de la nube de vapor con clima F2: 2/3.

Probabilidad de un BLEVE: 0,5.

Probabilidad de piscina de fuego (ignorada): 0.

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. Díaz (2013) recomienda que estas probabilidades deben ser calculadas para la zona de estudio a partir de datos climatológicos que sean representativos de la misma.

Se comparte el criterio conformado por Díaz (2013) de utilizar el análisis histórico de accidentes como técnica inicial de análisis, pues es una metodología recomendada por la mayoría de los expertos por ser simple y económica, por no comprometer muchos recursos materiales o humanos y que además detecta peligros absolutamente reales que ya en el pasado se han puesto de manifiesto. La misma será complementada con la técnica del árbol de sucesos con la cual podrá realizarse un análisis más exhaustivo de los riesgos de la planta.

1.4 Software que son utilizados para estimar áreas de atmósferas peligrosas

En la actualidad se conocen diferentes *softwares*, que son utilizados en el mundo para la evaluación y estimación de áreas de atmosferas peligrosas, como los que se describen a continuación:

ALOHA

Según Henri *et al.* (2016) y Poluyan *et al.* (2017) ALOHA es una novedosa herramienta de desarrollo de *software*.

Mientras que los sistemas utilizados hasta la fecha se centran únicamente en mediciones de unidades de prueba, ALOHA permite una gestión de problemas más amplia y permisos de propiedad. De hecho, ALOHA incluye una referencia que contiene todos los activos afectados por el ciclo de gestión (central eléctrica, presas, cerraduras, diques, equipos de medición, etc.).

La buena gestión del riesgo depende de la capacidad de partes interesadas para tomar las decisiones correctas basadas en información del campo y las diversas herramientas que ayudan en el proceso de toma de decisión. ALOHA es una parte integral de las herramientas para ayudar en la toma de decisiones frente a una crisis debido a sus siguientes características:

- Herramienta integrada.
- Gestión de flujo de trabajo.
- Interoperabilidad y portabilidad de herramientas.

- Herramienta de análisis.

Módulos específicos para el examen de estructuras hidráulicas.

ALOHA está diseñado para usarse durante derrames químicos accidentales para ayudar a evaluar el riesgo para las poblaciones humanas asociado con el aire tóxico peligroso, radiación térmica de incendios y efectos de explosión. Además, para proporcionar un límite superior cercano a las distancias de amenaza, asociadas con productos químicos, derrames de una escala típica de accidentes de transporte, con zonas de amenaza típicas en el rango de 100 a 10 000 m, se limita a los riesgos asociados con los vapores químicos o químicos que llegan al aire. También, incluye una extensa biblioteca de datos de propiedades químicas y modelos para evaluar la velocidad a la que se libera un químico de la contención y se vaporiza. Utiliza una interfaz gráfica para la entrada de datos y la visualización de resultados. Exposiciones a químicos tóxicos, vapores, sobrepresión, radiación térmica o áreas donde hay gases inflamables presentes, representado gráficamente y con un resumen de texto. El principal propósito del *software*, es proporcionar estimaciones del personal de respuesta a emergencias sobre la extensión espacial de algunos peligros comunes asociados con derrames químicos.

El equipo de desarrollo de ALOHA también reconoce que puede ser una herramienta adecuada para la capacitación y la planificación de contingencias, pero los usuarios deberían permanecer conscientes de su propósito principal en la respuesta a derrames. Trata específicamente con los riesgos para la salud humana asociados con la inhalación de vapores químicos tóxicos, radiación térmica de incendios químicos y los efectos de la onda de presión de explosiones de nubes de vapor. Dado que ALOHA se limita a los productos químicos que se transportan al aire, incluye modelos para evaluar la tasa a que una sustancia química se libera de la contención y se vaporiza. Estos modelos de "fuente de fuerza" pueden ser componentes críticos en el proceso de evaluación de peligros. Vincula los modelos de fuerza de origen a un modelo de dispersión para estimar la extensión espacial de nubes tóxicas, vapores inflamables y explosivos, nubes de vapor, sin embargo, no modela todas las combinaciones de fuerza de fuente, escenario y categoría de peligro para escenarios de combustión. Utiliza una interfaz gráfica para la entrada de datos y la visualización de resultados. El área donde hay una posibilidad de exposición a vapores tóxicos, atmósfera inflamable, sobrepresión de una nube de vapor, explosión o radiación térmica de un incendio, se representan gráficamente como zonas de amenaza (Jones *et al.*, 2013).

CALPUFF y CALMET

El modelo meteorológico CALMET se ejecutó durante un año completo desde el primero de enero de 2007 hasta el primero de enero de 2008 (Milner, 2016). Consta de un módulo de diagnóstico del campo eólico y micro meteorológico, módulos para capas de límite sobre el agua y sobre tierra según Douglas y Kessler (citado por Milner, 2016).

Según Hernández (2016) y Milner (2016), el módulo de campo de viento de diagnóstico utiliza dos pasos, aproximación al cálculo de los campos de viento y campo de viento final.

En el primer paso, se ajusta un campo de viento de conjetura inicial para los efectos cinemáticos del terreno, los flujos de pendiente y efectos de bloqueo del terreno para producir un campo de viento del paso uno.

El segundo paso consiste en un procedimiento de análisis objetivo para introducir observaciones en el campo de viento del paso uno para producir un campo de viento final.

El módulo de campo se puede ingresar a CALMET como el campo de adivinanza inicial o el campo de viento del paso uno según Douglas y Kessler (citado por Milner, 2016).

Según Tech (2017), CALMET determina la estructura en los campos de viento donde usa su campo de viento de diagnóstico, en lugar de ser impulsado por observaciones.

Las simulaciones CALPUFF se llevan a cabo mediante las siguientes opciones de modelo:

- Distribución gaussiana de campo cercano.
- Aumento de penacho de transición.
- Punta de la pila.
- Coeficientes de dispersión PG (áreas rurales), coeficientes de McElroy- Pooler.
- Áreas urbanas.
- Transición de F y a (Heffter) tasas de crecimientos dependientes del tiempo.
- Ajuste parcial de trayectoria de penacho para terreno.
- Deposición húmeda, deposición seca y algoritmos de transformación química.

***Software* DEGADIS**

El modelo integral DEGADIS fue desarrollado para el Instituto de Investigación de Gas y la Guardia Costera de Estados Unidos específicamente para tener en cuenta efectos como la propagación de la

gravedad, efectos de flotabilidad negativos o positivos en el arrastre de aire, transferencia de calor de superficie a nube, y efectos de energía de cambio de fase asociados con la humedad del aire en la dispersión de modelado de gases densos. La base teórica y experimental para el modelo se describió en Gas (Castro y Castro, 2014).

Software DISPER 5.2

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

Para analizar las consecuencias que traen consigo los accidentes mayores se pueden utilizar modelos de cálculo que, según Turmo (1994), intentan predecir que va a ocurrir ante un determinado incidente. Estos modelos pueden ser de simulación de escapes de sustancias tóxicas e inflamables, de dispersión de estas sustancias y de explosiones de incendios que brindan los datos necesarios para evaluar los daños a personas y edificios. Todos ellos se agrupan dentro de los llamados modelos de vulnerabilidad.

Los modelos de vulnerabilidad sirven para determinar las consecuencias que se derivan de la exposición de las personas y edificios a una determinada carga térmica, tóxica o de sobrepresión. Uno de los modelos más utilizados son las ecuaciones *Probit*, método estadístico que relacionan la intensidad de la radiación térmica y la sobrepresión con el grado de lesión o daño que pueda resultar a partir de estos. 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 (Domínguez, 2014 y Wells, 2003).

1.5 Métodos para la determinación del efecto de la radiación y la sobrepresión sobre las personas

Para realizar una estimación de las consecuencias se requiere una función que relacione la magnitud del impacto con el grado de daño que este provoca; es decir, una relación establecida para tal efecto

de dosis-respuesta. El método cada vez más usado es el análisis *probit*, que relaciona las variables *probit*, procedente del inglés probability unit con la probabilidad en porcentaje de población afectada (Casal *et al.*, 1996).

Según Domínguez (2014), López (2017) y Wells (2003), uno de los métodos más comunes en el análisis de consecuencias de accidentes industriales es el “análisis *probit*”.

Al calcular el riesgo de un establecimiento severo con sustancias tóxicas, las funciones *probit* se utilizan para tener una relación entre la letalidad humana por un lado y la concentración de sustancias tóxicas por otro lado. De igual manera las ecuaciones *Probit*, relacionan la intensidad de la radiación térmica, y la sobrepresión con el grado de lesión o daño que pueda resultar a partir de estos.

1.6 Variables climatológicas en la zona de estudio

Las características climatológicas de la zona de estudio influyen en el comportamiento y dimensión de algunos escenarios riesgosos, surgidos por escape de una sustancia química en fase líquida o gaseosa, inflamable o no, por lo que resulta importante conocer las variables climatológicas más representativas en la zona de estudio.

Moya (2010) ha realizado estudios climatológicos a lo largo de una década, en la zona de estudio seleccionada por la autora, tiene en cuenta el comportamiento de la nubosidad, temperaturas máximas y mínimas, humedad relativa y velocidades del viento. Agrega este especialista en sus estudios que el comportamiento del régimen térmico define la zona como un régimen de tipo costero, caracterizado por un régimen térmico muy cálido con días cálidos de pequeña oscilación diaria y días frescos. Existe en el año dos períodos definidos, de mayo a septiembre, con un predominio de días muy cálidos y otro de noviembre a marzo, con días agradablemente cálidos o frescos, aunque en ocasiones pueden llegar a ser fríos. Entre ambos aparecen espacios de tiempo donde se entremezclan estas características y que se definen como pequeños períodos de tránsito, donde queda definido del análisis del régimen térmico cuatro épocas fundamentales: un verano, un invierno y dos períodos de transición: uno del invierno al verano y otro del verano al invierno.

Díaz (2013), basado en estudios realizados por López (2010) y Nguyen (2011), señala que la zona en estudio se caracteriza por una temperatura media anual de 23,8 °C, registrándose los valores más elevados del año en los meses de julio (26,3 °C), y agosto (26,1 °C), mientras los más bajos promedios mensuales se registran en febrero (20,5 °C) y enero (20,6 °C).

En lo relativo al comportamiento de la humedad y los vientos en la zona de estudio Díaz (2013) plantea que:

La humedad relativa muestra valores elevados durante el año dada la cercanía a la costa. El promedio anual es de 79 %, con valores medios mensuales superior es a 75 % durante casi todo el año, sólo durante abril, que constituye el mes menos húmedo del año alcanza un valor del 73 %, mientras en septiembre y octubre, los meses de mayores reportes de humedad relativa alcanza valores del 84 %.

El viento predominante en la zona es del Este (E), con una frecuencia de ocurrencia de 15,7 %, seguido del Este Noreste (ENE) con una frecuencia de 9,1 %. La suma de la frecuencia de los vientos del primer cuadrante (N-E) y la de los siguientes rumbos cercanos al E, ESE y SE alcanza un valor de 52,2 %, más un 33 % de frecuencia de las calmas, dejan al resto de los vientos de otros rumbos un 14,8 % de frecuencia de ocurrencia.

A través de criterio de diferentes especialistas como Vílchez (2006) y Wells (1997), las propias consideraciones del *software* ALOHA y apoyándose en los registros climatológicos reportados por Moya (2010), que se muestran en el **Anexo 2**, Díaz (2013) encuentra, en su trabajo, que para el área donde se encuentra ubicada la planta de gas licuado del petróleo, las estabilidades atmosféricas que se manifiestan son: F y D.

La estabilidad F corresponde a la categoría de atmósfera estable y se manifiesta para velocidades del viento no mayores de 3 m/s y cobertura nubosa media o baja. Por otra parte la estabilidad D corresponde a la categoría de atmósfera neutra y se manifiesta para velocidades del viento mayores de 3 m/s y cobertura nubosa media.

Se define estudiar los meses: enero, abril, julio y octubre, pues son los que presentan mayores variaciones en las condiciones climatológicas, según Díaz (2013), Naranjo (2019) y Nguyen (2011).

La autora de este trabajo considera científicamente argumentados los criterios relacionados con las variables climatológicas, aportados por los diferentes investigadores anteriores y asume los mismos en su investigación.

Según la opinión de la autora de este trabajo, los datos aportados por López (2010), Moya (2010) y Nguyen (2011) referidos a las condiciones climatológicas de la zona de estudio, son representativos y pueden ser utilizados para la evaluación de áreas de atmósferas peligrosas, lo cual está fundamentado en los estudios realizados por Díaz (2013).

1.6. Conclusiones Parciales.

- Los incendios y las explosiones son los accidentes de mayor impacto que se producen en instalaciones industriales, con mayor frecuencia en las de gas licuado.
- Se aceptan como válidas para la evaluación de los escenarios de incendio y explosión, los meses de enero, abril, julio y octubre y las estabildades atmosféricas F y D.
- La probabilidad calculada, por medio de un registro histórico actualizado y amplio permite elaborar un árbol de sucesos que ofrece datos más exactos en relación con la aparición de unos y otros escenarios.
- Entre los distintos *software* que se utilizan para la evaluación de áreas de atmósferas peligrosas, ALOHA brinda resultados muy confiables y es además el recomendado por la EPA y el MCITMA.
- Las ecuaciones *Probit* son un método sencillo para la determinación del efecto de la radiación y la sobrepresión sobre las personas y las edificaciones.

CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS

Este capítulo comienza con una caracterización detallada de la planta de almacenamiento de gas licuado del petróleo, ubicada en la latitud 23 - 04 norte y la longitud 81 - 34 oeste, al norte de la Bahía de Matanzas, y con una descripción toxicológica de la sustancia en cuestión (gas licuado del petróleo). Además, se profundiza en las metodologías de análisis y evaluación de riesgos que son usadas a lo largo de la investigación.

2.1 Caracterización de la planta de gas licuado del petróleo

La planta de Gas Licuado inaugurada en 1985 ubicada en la costa norte de la Bahía de Matanzas, consta con una gama de balas de procedencia rusa y norteamericana, existen 21 balas de gas licuado dispuestas en cuatro cubetos. La relación de las balas por cubetos es mostrada en la siguiente tabla.

Tabla 2.1: Distribución de las balas de almacenamiento de gas licuado del petróleo.

Cubetos	Cantidad de balas	Capacidad de las balas (m³)	Capacidad del cubeto (m³)
1	8	112	510
2	5	200	850
3	5	200	850
4	3	200	761,6

Fuente: Díaz, (2013).

La planta posee además una estación de bombas con cinco bombas de las cuales dos se utilizan en el llenado de cilindros y tres en la carga y descarga de buques y camiones cisterna y una estación de dos compresores.

La planta tiene como objetivo principal la recepción y distribución de dicho producto la cual llega a la base por vía marítima, se almacena en las balas, se comercializa en la provincia distribuyéndose en carros cisternas a hoteles y edificios multifamiliares, además se llenan balones de 11,34 kg y 45,36 kg para la distribución al resto de la población.

En el **Anexo 3** se muestra la cantidad de trabajadores que presenta la planta.

2.2 Determinación toxicológica de la sustancia a tratar, gas licuado

La identificación y caracterización correcta de la sustancia a tratar, es el primer paso importante para la determinación correcta del peligro potencial de una instalación industrial. La caracterización de la sustancia se realiza según el criterio y guía de Orozco (2020) (**Anexo 4**).

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.

T L V -límite superior de inflamabilidad.

IPVS - Límite inferior de explosividad.

Punto de congelación.

Temperatura de auto ignición.

Coefficiente de expansión.

Temperatura de inflamación.

Energía mínima de ignición.

Solubilidad.

Presión de vapor.

Biodegradabilidad.

Corrosión.

Capacidad calorífica.

Formas de control y mitigación en casos de desastres

Productos o técnicas empleados en el control y mitigación en caso de desastre.

Existencia del producto de control y mitigación en la entidad (especificar cantidad y capacidad de mitigación).

Peligros para la salud

Concentración permisible.

Exposición permisible.

Emergencias.

Partes del cuerpo que afecta.

Forma de entrada al organismo.

Toxicidad (se debe llenar una tabla con la siguiente información)

Tabla 2.2: Clasificación toxicológica de las sustancias involucradas en el proceso.

Sustancia	Toxicidad							
	TA	I	SB	TRD	MG	CG	C	TR

Nota: En el caso de la irritación debe aclararse si es a los ojos (O), piel (P) o respiratoria(R).

Leyenda

TA: Toxicidad aguda.

I: Irritación.

SB: Sensibilización.

TDR: Toxicidad por dosis repetida.

MG: Mutagenicidad.

CG: Carcinogenicidad.

C: Corrosión.

TR: Toxicidad para la reproducción.

Datos de reactividad

Reacción principal y reacciones secundarias.

Cinética de reacción.

Contaminantes producidos.

Reacciones de descomposición

Condiciones de almacenamiento y manipulación

Nombre del producto almacenado.

Capacidad del recipiente de almacenamiento.

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.

Condiciones de almacenamiento de la sustancia.

Cantidad de sustancia almacenada.

Registro histórico de averías producidas en el recipiente. Casos de derrames, salideros, etc. (definir fecha y cantidad de producto vertido).

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, etc.)

Fallos ocurridos en estos equipos al operar con estas sustancias.

Material de construcción de los equipos donde es usada.

Longitud de tubería que conduce la sustancia desde el punto de almacenamiento hasta el equipo donde es usada.

Diámetro de la tubería.

Cantidad de accesorios y tipos en esa tubería. (Deben señalar que posición ocupa cada accesorio en la tubería o sea a que distancia están ubicados con respecto al punto de almacenamiento).

Material de construcción de los accesorios y las tuberías.

Protección del sistema de tuberías.

2.3 Metodología de elaboración y análisis del árbol de sucesos

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

Según Wells (citado por Díaz, 2013), establece la siguiente metodología para la realización y análisis del árbol 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 evento. 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 si o puede ocurrir corresponde a la rama superior y no o no puede ocurrir corresponde a la rama inferior.

4. 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.

5. Estimar la posibilidad 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.

6. Clasificar los resultados y determinar su probabilidad. La frecuencia de cada resultado es determinada mediante la multiplicación de 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.

2.4 Desarrollo de las características y particularidades sobre el *software* de evaluación de áreas de atmósferas peligrosas (ALOHA)

Según Loi y Meloni (2018), el programa ALOHA emplea en sus cálculos dos modelos de dispersión: un modelo Gaussiano para gases ligeros que ascienden rápidamente, y el modelo Degadis para gases densos que se dispersan a ras de suelo. Ambos modelos predicen la velocidad de emisión de vapores químicos que escapan a la atmósfera desde tuberías rotas, fugas de tanques, charcos de líquidos tóxicos en evaporación o directamente desde cualquier otra fuente de emisión. Por tanto, ALOHA es capaz de estimar cómo una nube de gas peligrosa podría dispersarse en la atmósfera después de una descarga química accidental. Es de ejecución rápida en ordenadores de sobremesa y portátiles (PC o Macintosh), que son fácilmente transportables y accesibles al público.

Su diseño es sencillo e intuitivo, de modo que pueda operarse rápida y fácilmente durante situaciones de alta presión. Contiene una base de datos con información sobre las propiedades físicas de unos 1 000 productos químicos peligrosos comunes. Los cálculos realizados por el ALOHA representan un compromiso entre exactitud y velocidad: se ha diseñado para que produzca buenos resultados con la suficiente rapidez para que puedan usarlo los responsables de los servicios de emergencia. Además, revisa la información que se le introduce y avisa cuando se comete un error.

Cuando se utiliza para predecir los efectos de una explosión, es preciso tener en cuenta el entorno del lugar de la explosión a la hora de interpretar las zonas de riesgo (*threat zone*) estimadas. Objetos de gran tamaño (como edificios o árboles) en el camino de la onda de presión pueden afectar a su fuerza destructiva y la dirección que tome. Por ejemplo, si varias edificaciones rodean el lugar de la explosión, la onda explosiva real será más pequeña que la predicha por el ALOHA. Pero al mismo

tiempo, se generarán más residuos desprendidos súbitamente al causar daños estructurales en los edificios.

El nivel de preocupación (LOC) que se emplea para trazar las zonas de riesgos de una explosión es la sobrepresión u onda explosiva. Se trata del nivel umbral de presión de la onda explosiva a partir del cual puede existir determinado peligro. Cuando se modela un escenario de explosión, ALOHA sugiere tres valores de sobrepresión por defecto. El programa utiliza estos valores umbrales para crear las siguientes zonas de riesgo:

Rojo: 55,158 kPa (destrucción de edificios)

Naranja: 24,131 kPa (probables lesiones graves)

Amarillo: 6,894 kPa (rotura de cristales)

ALOHA modela cinco tipos de escenarios de fuego y explosiones asociados con emisiones de compuestos químicos.

- Chorros de fuego
- Piscinas de fuego
- BLEVE: Explosión de vapor por la expansión de un líquido en ebullición.
- Áreas inflamables.
- Explosión de una nube de vapor.

La versión del *software* que se utiliza es la 5.4.7 de febrero del 2007, la versión más actualizada de este *software* y por tanto la más indicada.

ALOHA estima la velocidad a la que un contaminante podría infiltrarse en un edificio donde se asume que las puertas y ventanas del mismo están cerradas. Si las puertas y ventanas están abiertas, y las condiciones meteorológicas son las adecuadas, la concentración en el interior podría ser superior a la indicada por el *software*.

Puede utilizar la información suministrada sobre las propiedades y cantidad de compuesto químico liberado para elegir entre el modelo de dispersión Gaussiano y el modelo de gases pesados en sus cálculos. El usuario también puede especificar el modelo de dispersión que debe usar el ALOHA.

Los resultados pueden ser poco fiables cuando se dan las condiciones siguientes, debido a las limitaciones que presenta el *software*:

Velocidades de viento muy bajas (pues la dirección del viento es menos predecible en tal caso)

Condiciones atmosféricas muy estables (suelen darse de madrugada o por la mañana temprano cuando casi no hay viento, en ese caso el compuesto químico liberado “casi” no se mezcla con las capas de aire a su alrededor, por tanto puede alejarse del lugar del accidente sin diluirse en la atmósfera y permanecer en altas concentraciones dentro de la nube contaminante).

Desigualdad de concentración cerca de la fuente de emisión del contaminante (debido a remolinos de viento u otros movimientos aleatorios, que pueden aumentar o disminuir la concentración de contaminante en un punto respecto al valor inicialmente estimado para dicho punto).

Cambios de viento y efectos de conducción del terreno (en valles y colinas, o zonas urbanas)

El modelo no incorpora efectos de:

- Reacciones química.
- Partículas.
- Mezcla de compuestos químicos.
- Terreno.
- Fragmentos peligrosos.

ALOHA no tiene en cuenta los efectos de:

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

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

- Indicar la ciudad donde puede ocurrir el accidente químico.
- Seleccionar el compuesto químico.
- Dar la información de las condiciones meteorológicas en el período que queremos realizar la predicción del evento.

- Describir como los compuestos químicos escapan a la atmósfera.

El *software* ALOHA da su respuesta en el monitor, a través de un diagrama denominado *Threat Zone*, el cual muestra el área donde las concentraciones del compuesto químico en el aire pueden ser suficiente altas que provoque afectaciones a la población, en los tres niveles de LOC.

2.5 Metodología para la determinación del efecto de la radiación y la sobrepresión sobre las personas y las edificaciones

Se emplea en esta investigación el método *Probit*, que nos da una relación entre la función de probabilidad y una determinada carga de exposición a un riesgo.

En este método, se parte de una manifestación física de un incidente (por ejemplo, la concentración tóxica y tiempo de exposición en una cierta área geográfica) y da como resultado una previsión de los daños a las personas expuestas al incidente (es decir, número de heridos, número de víctimas, etc.).

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 expuesta en el **Anexo 5**.

La variable dependiente Pr se ha establecido como una variable aleatoria según una distribución estadística normal con un valor medio de cinco y una desviación tipo (desviación estándar) uno, lo cual significa que a un porcentaje del 50 % corresponde un valor del *Probit* = cinco.

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

2.5.1 Método *Probit* de vulnerabilidad a explosiones e incendios

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 Eisenberg *et al.* (1975) y se desglosan a continuación:

- Muerte por lesiones pulmonares. Para determinar el porcentaje de muertes por hemorragia pulmonar se emplea la ecuación *Probit* (2.1):

$$Pr = -77,1 + 6,91 \ln P \quad (2.1)$$

Donde:

P = sobrepresión máxima (N/m²).

- Rotura de tímpano El porcentaje de afectados por rotura de tímpano se determina por la ecuación (2.2):

$$Pr = - 15,6 + 1,93 \ln P \quad (2.2)$$

Donde:

P = sobrepresión máxima (N/m²).

- Muerte por impacto del cuerpo. El porcentaje de muertes por desplazamiento y colisión del cuerpo contra obstáculos se determina por la ecuación (2.3):

$$Pr = - 46,1 + 4,82 \ln J \quad (2.3)$$

Donde:

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

- Lesiones por impacto del cuerpo. El porcentaje de lesionados por desplazamiento y colisión del cuerpo contra obstáculos se determina por la ecuación (2.4):

$$Pr = 39,1 + 4,45 \ln J \quad (2.4)$$

Donde:

J = impulso (N.s/m³).

2.5.2 Vulnerabilidad a radiaciones térmicas

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

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

Si el gas no se enciende inmediatamente, se dispersará en la atmósfera. Si la nube de gas formada se encuentra con un foco de ignición en sus proximidades, se supone que cualquier persona presente dentro de la nube de gas que arde morirá a consecuencia de quemaduras y asfixia. En la zona externa a la nube de gas, aunque la duración de la radiación térmica generalmente será breve, los daños estarán en función de la distancia y habrán de ser evaluados en cada caso (Naranjo, 2019).

La institución holandesa TNO presenta las ecuaciones *Probit* siguientes:

- Quemaduras mortales (protegidos con ropas):

$$Pr = -37,23 + 2,56 \cdot \ln(t \cdot I^{4/3}) \quad (2.5)$$

- Quemaduras mortales (sin protección):

$$Pr = -36,38 + 2,56 \cdot \ln(t \cdot I^{4/3}) \quad (2.6)$$

- Quemaduras de segundo grado:

$$Pr = -43,14 + 3,0188 \cdot \ln(t \cdot I^{4/3}) \quad (2.7)$$

- Quemaduras de primer grado:

$$Pr = -39,83 + 3,0186 \cdot \ln(t \cdot I^{4/3}) \quad (2.8)$$

Donde:

t = Tiempo efectivo de exposición (s).

I= Intensidad de irradiación (W/m^2).

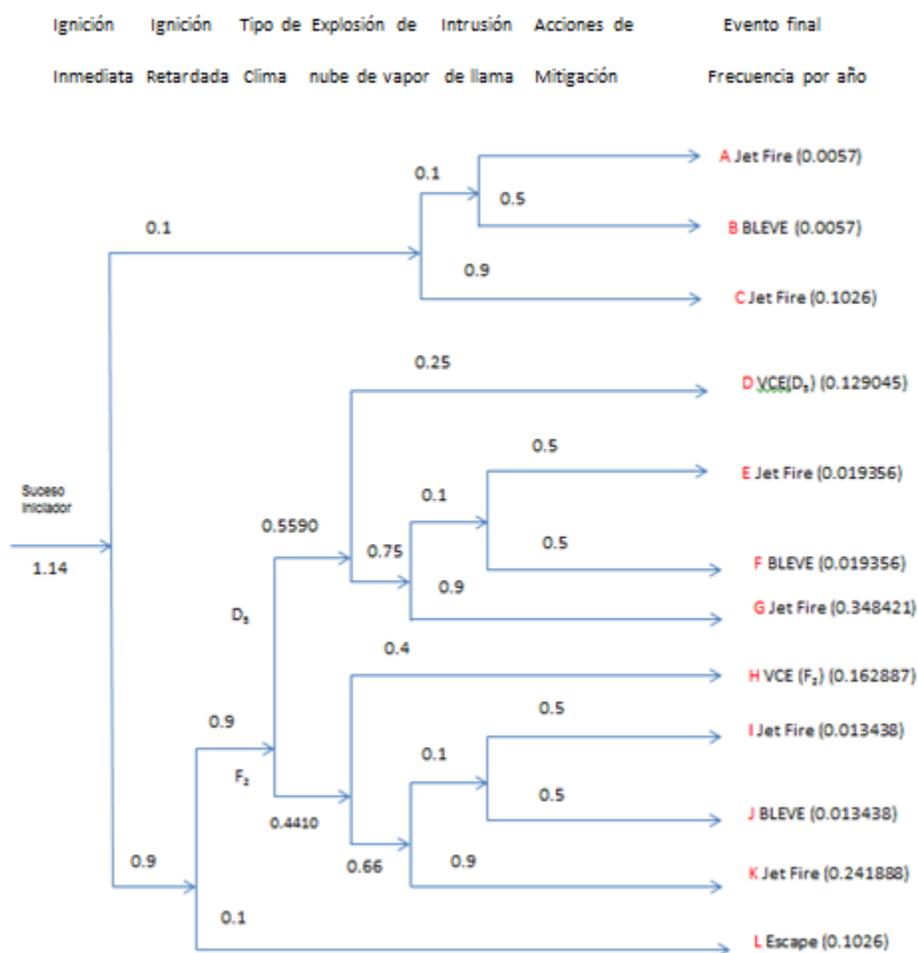
2.6 Determinación de las pérdidas económicas por sustitución de equipos dañados

Naranjo (2019) señala que para realizar el análisis económico se debe evaluar la magnitud de las afectaciones en las distintas áreas, para poder determinar cada uno de los equipos afectados. Seguidamente a través del CAPCOST 2006 se puede obtener el valor del costo de adquisición de cada uno.

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En el presente capítulo se realiza un análisis de las áreas de atmósferas peligrosas obtenidas mediante el *software* ALOHA, ocasionadas por los distintos escenarios de riesgo. Se determinan las afectaciones que originan estos accidentes sobre el personal de la Planta de Gas Licuado y la población de la ciudad de Matanzas. Además, se estima el impacto económico del más destructivo de los escenarios originado por un posible accidente.

3.1 Análisis del Árbol de Sucesos



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.1: Árbol de Sucesos.

Cada escenario que se muestra en el árbol de sucesos se corresponde con lo que históricamente ha ocurrido en accidentes donde se encuentra involucrado el GLP. Las investigaciones como esta sólo pueden cambiar la frecuencia de algún evento, de manera que se trabaja entonces con las reportadas por el investigador solamente, o con estas más las que se encuentren en cada caso, debidamente fundamentadas.

Se sigue la técnica de los estudios realizados por Wells (2003), donde señala que la probabilidad, para los diferentes sucesos por él calculada, pueden ser usadas para plantas similares y que en el caso de las estabildades atmosféricas su cálculo depende de las condiciones climatológicas de la zona de estudio, se decide utilizar, para los sucesos: ignición inmediata, no ignición, explosión de la nube de vapor, intrusión de llama y acciones de mitigación, las probabilidades reportadas por Wells (2003), dado que las mismas no dependen en modo alguno de las características climatológicas de la zona de estudio y si dependen de una cadena de sucesos comunes en estos tipos de plantas.

A través del criterio de diferentes especialistas como Vílchez (2006) y Wells (2003), la probabilidad de la estabilidad climatológica podrá estimarse si se tiene en cuenta el país y las características de la zona de estudio.

Díaz (2013), demuestra, apoyándose en los registros climatológicos reportados por Moya (2010), mostrados en el **Anexo 2**, que las dos estabildades atmosféricas prevalecientes en la zona ,donde se encuentra ubicada la Planta de Gas Licuado del Petróleo, son las estabildades atmosféricas F y D, y que la categoría atmosférica estable (F) tiene asociada una frecuencia de 44,10 % incluyendo los períodos de calma que poseen velocidades del viento despreciables, mientras que a la estabilidad atmosférica correspondiente a la categoría neutra (D) le corresponde una frecuencia de 55,90 %.

Los escenarios que se representan en el árbol de sucesos son los que Wells (2003) afirma que surgen en plantas similares a la estudiada por él, por lo que se definen, para este trabajo, los siguientes: explosión de vapores que se expanden al hervir el líquido (BLEVE), dardo de fuego (*jet fire*), explosión de la nube de vapor (*vapor cloud explosion*) y escape (*toxic area of vapor cloud*).

La metodología para la confección de este árbol de sucesos, establece la determinación de la frecuencia de un suceso iniciador, en esta investigación fue necesario determinar la frecuencia de ocurrencia de escapes de gas, a través de un Análisis Histórico de Accidentes (**Anexo 1**). El resultado fue que la frecuencia del mismo era: 1,14 veces al año.

Según Wells (2003), la VCE se verifica en atmósferas con estabilidades “D” y “F” con una probabilidad de 0,25 y 0,66 respectivamente, y para las acciones de mitigación o lucha contraincendios 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 2f**, donde se le asigna a cada escenario producto de una cadena de sucesos una letra.

El análisis del árbol de sucesos debe realizarse si se tiene en cuenta cada una de las secuencias lógicas de sucesos, se inicia a través del suceso iniciador del accidente. Si se toma, por ejemplo, la salida superior que termina con un escenario de VCE el análisis sería el siguiente.

Una vez ocurrido un escape mayor de GLP (suceso iniciador), el cual ocurre con una frecuencia estimada de 1,14 veces/año el 90 % de las veces se produce la ignición retardada del GLP, lo que se traduce como que 1,026 veces/año, aparece un escape con ignición retardada. Finalmente, se verifica con estabilidad D, una VCE con una probabilidad de 0,25, de manera que, como no es posible efectuar mitigación para este escenario, la formación de la VCE sucede por esta concatenación de sucesos con una frecuencia de 0,1032 veces/año.

De esta misma manera se pueden analizar cada una de las cadenas del árbol de sucesos, obteniéndose la frecuencia de ocurrencia de cada escenario, para las condiciones de estabilidad del clima de la zona de estudio y la frecuencia del suceso inicial.

Una observación detallada de los posibles escenarios que aparecen en el árbol de sucesos muestra que la cadena de sucesos de mayor frecuencia es la G, la cual está asociada a un *jet fire* y posee una frecuencia de 0,348421 veces/año, lo que equivale a que cada 2,87 años se puede presentar este escenario de accidente bajo esta cadena de sucesos. Otros escenarios significativos en relación con su frecuencia son también los *Jet Fire* correspondientes a las cadenas de sucesos C y K con períodos de aparición de 9,74 y 4,13 años respectivamente, y las explosiones de las nubes de vapor de las cadenas

de sucesos D y H con períodos de aparición de 7,74 y 6,13 respectivamente. Por último el escenario de escape correspondiente a la cadena de sucesos L puede manifestarse una vez cada 9,74 años.

De los datos obtenidos del árbol de sucesos se calcula la frecuencia de ocurrencia de cada escenario, así como el período en año en que puede presentarse el escenario en una planta de este tipo. Los datos obtenidos se muestran en la **tabla 3.1** siguiente.

Tabla 3.1: Frecuencia y período de aparición de los escenarios.

Escenario	Frecuencia (año⁻¹)	Periodo de aparición (año)
<i>Jet Fire</i>	0,805607	1,24
BLEVE	0,038494	25,97
VCE	0,291932	3,42
Nube Tóxica	0,020502	48,77

Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse en la tabla anterior el escenario que con mayor frecuencia que puede aparecer es el *Jet Fire*, en la Planta de Almacenamiento de Gas Licuado aproximadamente una vez cada dos años, de este modo una explosión de la nube de vapor (VCE) puede ocurrir una vez cada cuatro años aproximadamente y un escape cada 49 años. El mayor período de aparición le corresponde al BLEVE que es por tanto el de menor frecuencia.

3.2 Establecimiento de las condiciones de trabajo con el *software*

Para trabajar con el *software* ALOHA, se establecen condiciones, como son:

Trabajar con los valores medios de las variables que caracterizan a la zona analizada, según los estudios realizados por López (2010), Moya (2010) y Nguyen (2011).

1. Evaluar solo de los escenarios que aparecen en el árbol de sucesos, los de incendio y explosión.
2. Se evalúan las direcciones del viento donde se encuentran las áreas con mayor concentración de trabajadores dentro de la UEB y las correspondientes a los consejos populares más poblados del municipio de Matanzas (**Anexo 6 y 7**). En el primer cuadrante de la rosa de los

vientos: NE, E y ENE; en el segundo: ESE y S; en el cuarto: NNW y NW. Además, se evalúa el estado de calma.

3. Mediante lo planteado por Díaz (2013) para velocidades del viento superiores a 3 m/s corresponde una estabilidad atmosférica de categoría D y cuando son inferiores a la misma categoría F.
4. Los escenarios BLEVE y *Jet Fire*, se evalúan atendiendo únicamente al dispositivo de almacenamiento y sus condiciones de operación, según Díaz (2013).
5. La explosión de la nube de vapor (VCE) se evalúa para las direcciones del viento establecidas en la cuarta consideración y las variables climatológicas de los meses de interés.
6. Se evalúa el escenario de VCE, atendiendo a la segunda condición y para los meses de: Enero, Abril, Julio y Octubre, definidos por Carmenate (2018).

3.3 Resultados de la aplicación del *software* ALOHA

Esta investigación es válida para todas las balas de almacenamiento de 200 m³, y se decide evaluar en otra oportunidad las de 100 m³, por lo que se analizan a continuación solo los escenarios vinculados a las balas de 200 m³. El mismo procedimiento de evaluación de atmósferas de riesgo se puede realizar para las balas de 100 m³, no se realiza por no disponer de las condiciones necesarias en este periodo de investigación, además sus resultados serán de menor efecto según demuestra Díaz (2013).

3.3.1 Análisis de los resultados de la explosión de la nube de vapor

Este escenario se caracteriza por el surgimiento de una sobrepresión que se origina cuando la nube de gas explota, los resultados obtenidos para los diferentes meses se reportan en los **Anexos 8, 9 y 10**. A continuación se muestran las áreas de peligro que se originan bajo las condiciones climatológicas correspondientes al mes de enero, en la dirección del viento ENE.

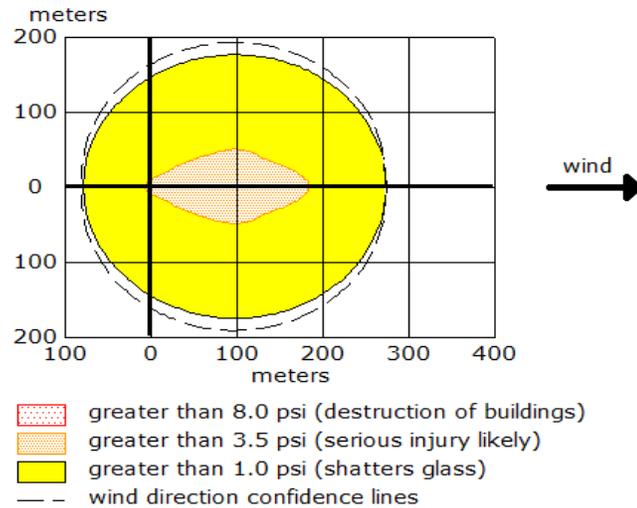


Figura 3.2: Comportamiento de la sobrepresión generada por la explosión de una nube de vapor en el mes de enero.

Lo más significativo en este escenario es que no se alcanza el efecto provocado por sobrepresiones mayores que 55,158 kPa (LOC-3), que provoca la destrucción de edificios, solo se pueden presentar como riesgos los de menor afectación que corresponden a los niveles inferiores LOC-1 y LOC-2 que provocarían la rotura de cristales y serias lesiones probables respectivamente.

Este escenario llega a alcanzar en su zona de menor peligro un área circular de 352 m de diámetro, mientras que la zona de mayor peligro (la zona roja), no se manifiesta. La zona naranja correspondiente a una sobrepresión de 24,131 kPa, presenta un largo de 186 m y un ancho de 198,3 m.

En la siguiente **Tabla 3.2** se muestran las áreas de peligro generadas por la explosión de una nube de gas para las direcciones ENE (la de mayor frecuencia y una de las de mayor velocidad), S (la de menor velocidad) y para las condiciones de calma.

Tabla 3.2. Comportamiento de la sobrepresión generada por la explosión de una nube de vapor en las direcciones de interés en el mes de enero.

Temperatura(°C)		32	Enero		
Nubosidad		5			
Humedad (%)		78			
Dirección del Viento	Vel Media del Viento (m/s)	Frecuencia	Sobrepresión (psi)	Largo (m)	Ancho (m)
E	4,28		8	-	
			3,5	193	189,2
			1	363,3	193,5
ENE	4,69	9,1	8	-	-
			3,5	181	193,2
			1	356,8	205
NE	4,17	9,4	8	-	-
			3,5	198	204
			1	375,8	200
NW	3,47	0,4	8	-	-
			3,5	224	242
			1	424,1	235
NNW	3,72	1,1	8	-	-
			3,5	207	231
			1	395	235
ESE	3,97	4	8	-	-
			3,5	202	204
			1	386,8	200
S	2,94	3,5	8	-	-
			3,5	257	296
			1	454	285

Fuente: Elaboración propia.

Se puede apreciar que los niveles de sobrepresión alcanzados en las diferentes zonas no varían, pero si varían las dimensiones de las áreas de la VCE, donde son mayores para la calma, lo que muestra el predominio de la variable velocidad del viento sobre la dimensión de las áreas en este tipo de escenario. Los resultados correspondientes al resto de los meses aparecen en el **Anexos 8**.

3.3.2 Análisis de los resultados de las áreas de atmósferas peligrosas originadas por un *Jet Fire*

Este escenario es que posee un buena probabilidad de ocurrencia se muestra a continuación.

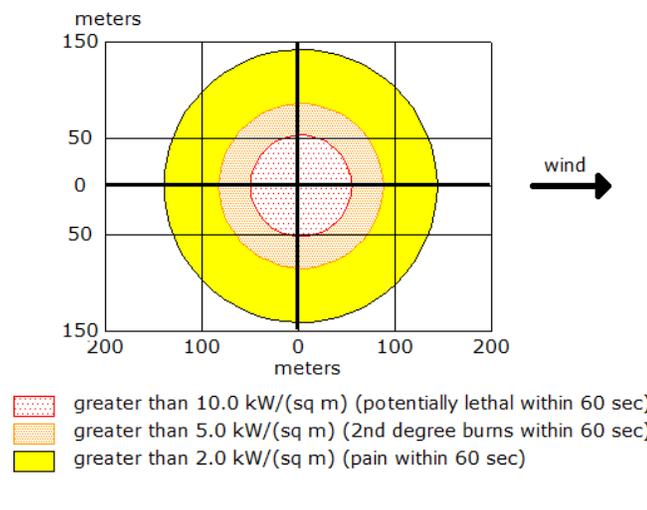


Figura 3.3: Comportamiento de la radiación originada por un *Jet Fire*.

Para el diámetro, correspondiente a la zona roja, se alcanza una radiación mayor que 10 kW/m² en 60 s, la cual resulta potencialmente letal.

En el área anular de la zona naranja, se alcanza una radiación mayor que 5 kW/m², lo que provoca quemaduras de segundo grado en 60 s.

En el área más exterior, se alcanza una radiación mayor que 2 kW/m², que puede causar irritación de la piel y dolor.

Como ha sido demostrado en trabajos anteriores, no es necesario evaluar este escenario para diferentes condiciones climatológicas, pues sus dimensiones no dependen de ellas y muy poco de la capacidad de la bala, más bien del diámetro de escape, y varía con ambas cosas el tiempo de duración del mismo, no así la razón de quemado.

Tabla 3.3: Resultados de la extensión de las áreas de peligro para un *Jet Fire* en balas de 200 m³ y el nivel de radiación para el radio medio de cada área.

Tipo de bala	Radiación (kW/m ²)	Radio del área(m)	Tiempo de duración. (min)	Razón de quemado (kg/min)	Longitud de la llama (m)
200 m ³	10	53,3	26	3620	58
	5	87,2			
	2	142,5			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.4: Resultados de la afectación de la radiación de un *Jet Faire* en la propia Planta de GLP.

Lugar	Radiación (kW/m ²), que alcanza al lugar	Afectaciones							
		Quemaduras mortales (con ropas de protección)		Quemaduras mortales (sin protección)		Quemaduras de segundo grado		Quemaduras de primer grado	
		Valor Pr	No. afect.	Valor Pr	No. afect.	Valo r Pr	No. afect.	Valor Pr	No. afect.
Bala más cercana (entre balas)	38,7	13	100%	14	100%	16	100%	20	100%
Bala más lejana	19,7	11	100%	12	100%	14	100%	17	100%
Garita de entrada (Bala más cercana)	29,5	13	100%	13	100%	16	100%	19	100%
Oficina de despacho	34,4	13	100%	14	100%	16	100%	19	100%
Oficina de control de técnico	39	13	100%	14	100%	17	100%	20	100%
Oficina general (Bala más cercana)	26,5	12	100%	13	100%	15	100%	18	100%
Área de llenado de	24,6	12	100%	12	100%	15	100%	18	100%

las balas comerciales									
--------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

De acuerdo con los índices de *Probit*, las 26 personas que laboran en la Planta de Gas Licuado, pueden sufrir quemaduras de mortales estén o no protegidos con ropas de aislamiento, lo cual no es ni mucho menos habitual, todas sufrirán quemaduras de primer grado y después van llegar a tener quemaduras de segundo grado.

3.3.3 Análisis de los resultados de las áreas de atmósferas peligrosas originadas por un BLEVE

En este capítulo se decide determinar mediante el *software* ALOHA las áreas que se originan para este tipo de escenario y se atiende solamente a la capacidad de almacenamiento, mediante la cuarta consideración. Para las balas de almacenamiento de 200 m³, las áreas de peligro se muestran a continuación.

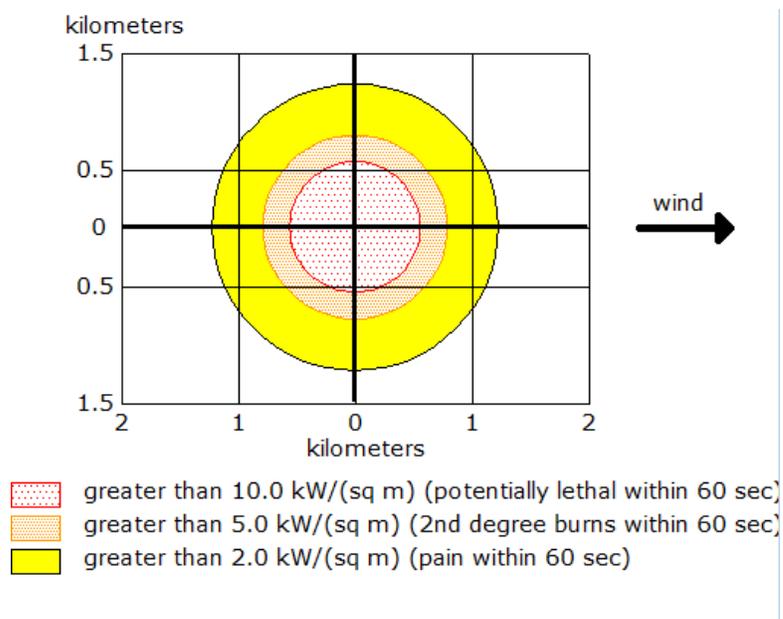


Figura 3.4: Comportamiento de la radiación originada por un BLEVE.

En el gráfico anterior se observa que, en la zona roja, se alcanza una radiación de 10 kW/m² en 60 s, la cual resulta potencialmente letal.

En el área anular de la zona naranja de un ancho de 220 m, se alcanza una radiación de 5 kW/m², lo que provoca quemaduras de segundo grado en 60 s.

En el área más exterior, de un ancho de 430 m aproximadamente, se alcanza una radiación de 2 kW/m², que puede causar irritación de la piel y dolor

Según el gráfico se compromete por radiación en un sentido u otro un área de 2450 m de diámetro.

Tabla 3.5: Dimensiones del escenario BLEVE para balas de 200 m³.

Dirección	Velocidad del Viento (m/s)	Radiación (kW/m ²)	Radio de la zona (m)	Diámetro de la bola de fuego (m)
200 m ³				
Calma	1	10	0,565	261
		5	0,785	
		2	1,235	

Fuente: Elaboración propia

Las dimensiones que se ofrecen anteriormente con respecto al escenario de BLEVE indican, que la mayor parte de la planta de GLP se ve afectada con una radiación de 10 KW/m², por lo que debe esperarse la muerte de los que se encuentren en esa zona, pero además se afectarán el resto de las balas, no solo por esta alta radiación sino también por cierto efecto de explosión. El área de oficinas y de despacho de gas se verá afectados por radiaciones correspondientes a las otras dos zonas.

3.4 Análisis de la influencia de la sobrepresión y la radiación térmica provocada por la explosión de una nube de vapor, un BLEVE y un *Jet Fire* sobre las personas y la planta

Los escenarios estudiados pueden provocar afectaciones a las instalaciones y a las personas, para definir si esto ocurre o no para la instalación de la planta y para los consejos populares se interpretan los siguientes datos y resultados.

3.4.1 Análisis de los resultados de las áreas de la nube de tóxica de GLP

Los resultados que se ofrecen a continuación permiten analizar las afectaciones que este tipo de escenario puede provocar.

Las condiciones de este período solo permiten evaluar este escenario para las balas de 200 m³.

Tabla 3.6: Dimensiones de la nube tóxica de GLP.

Temperatura(°C)		24,6	Octubre			
Nubosidad		4				
Humedad (%)		84				
Consejo popular	Dirección del Viento	Vel Media del Viento (m/s)	Concentración (ppm)	Largo (m)	Ancho (m)	Distancia media de la fuente de emisión al área (m).
Playa	NNW	3,72	AEGL-3(480)	168	28,83	3670
			AEGL-2(160)	341	53,2	
			AEGL-1(13)	1 500	142	
Pueblo Nuevo.	NNE	4,08	AEGL-3(480)	163	15	3840
			AEGL-2(160)	333	50,1	
			AEGL-1(13)	1 400	116	
Versalles	NE	4,17	AEGL-3(480)	162	24	1930
			AEGL-2(160)	332	52	
			AEGL-1(13)	1 400	142	
Reparto Dubroc	NNE	calma	AEGL-3(480)	287	156	1010
			AEGL-2(160)	528	200	
			AEGL-1(13)	2 300	460	
	NNE	4,08	AEGL-3(480)	163	15	
			AEGL-2(160)	333	50,1	
			AEGL-1(13)	1 400	116	
Matanzas este	NE	4,17	AEGL-3(480)	162	24	3170
			AEGL-2(160)	332	52	
			AEGL-1(13)	1400	142	
Matanzas oeste	NE	4,17	AEGL-3(480)	162	24	3720
			AEGL-2(160)	332	52	
			AEGL-1(13)	1 400	142	
Peñas A.	NW	3,47	AEGL-3(480)	172	49,7	4450
			AEGL-2(160)	348	80,8	
			AEGL-1(13)	1 500	158	

Fuente: Elaboración propia.

Con concentraciones correspondientes a un AEGL-1, al consejo popular del Reparto Dubroc afecta a su población, con ello sus habitantes pueden sufrir efectos moderados sobre su salud, como fuertes cefaleas, vómitos, afectaciones menores para la salud, etc.

Tabla3.7: Resultados de la afectación de una nube Tóxica de GLP a entidades cercana a la fuente de emisión.

Temperatura(°C)		32	Julio	
Nubosidad		6		
Humedad (%)		81		
Local	Dirección. del Viento	Vel Media del Viento (m/s)	Concentración (ppm)	Distancia media de la fuente de emisión al área (m).
Oficina de la planta	E	1	AEGL-2(18100)	84
Planta de conserva	N	1	AEGL-2(19000)	84
Frigorífico	SW	1	AEGL-1(15700)	96
Embace y despacho de balas de GLP	NW	1	AEGL-2(26100)	67
Pto de venta del frigorífico	E	1	AEGL-1(5450)	167

Se puede definir que una nube tóxica de GLP, que se origine por un accidente o escape en el mes de julio, en estado de calma, afecta a las instalaciones que se relacionan anteriormente en las correspondientes direcciones viento.

Así es posible afirmar que a 84 m del origen de la fuente, donde se encuentra las oficinas y la planta de conserva del Frigorífico se sentirán los efectos de las concentraciones correspondientes a un nivel dos de riesgo, en el cual según se señala en el propio *software* ALOHA, las personas sufren daños

irreversibles para su salud, estos pueden llegar a ser, según la características de la sustancia, trastornos respiratorios como una neumonía química y otros de tipo cardiovascular. Estas mismas afectaciones pueden llegar a afectar a los trabajadores del área de envase y despacho de la propia Planta de GLP situada a 67 m del escape. Es evidente que los operarios de las cámaras de enfriamiento de frigorífico, situadas a 96 m y los habitantes que acuden al punto de venta habilitado por esta empresa, solo se afectan con una concentración de nivel uno de riesgo

Los resultados que definen las afectaciones que pueden provocar, al personal de la planta de gas licuado, la formación de un dardo de fuego, que aunque de poca duración genera un gran radiación, se obtienen a partir de las expresiones que brinda la metodología *Probit* y se relacionan a continuación.

3.4.1 Análisis de la influencia de la concentración de una nube explosiva de GLP

Los resultados que se ofrecen a continuación corresponden al mes de enero, donde las nubes explosivas resultan ser de mayor tamaño de todas las estudiadas en este período.

Tabla 3.8: Resultados de las dimensiones de una nube explosiva de GLP y las distancias a los consejos populares.

Enero - Balas de 200 m³				
Consejos Populares	Dirección del viento.	Sobrepresión.	Largo de la nube (m).	Distancia media de la fuente de emisión al área (m).
Playa	E	8	-	2 760
		3,5	193	
		1	363,3	
Pueblo Nuevo	ENE	8	-	3 900

		3,5	181	
		1	356,8	
Versalles	NE	8	-	1 320
		3,5	198	
		1	375,8	
Reparto Dubroc	NW	8	-	470
		3,5	224	
		1	424,1	
Matanzas este	NNW	8	-	2 410
		3,5	207	
		1	395	
Matanzas oeste	ESE	8	-	3 080
		3,5	202	
		1	386,8	
Peñas Altas	S	8	-	3 900
		3,5	257	
		1	454	

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los resultados anteriores se aprecia que ninguno de los consejos populares se ve afectado por una sobrepresión que puede provocar en las edificaciones algunos daños.

3.4.2 Análisis de la influencia de la concentración de una nube explosiva, con respecto a la planta de GLP

Tabla 3.9: Resultados de las dimensiones de una nube explosiva de GLP y su relación con la planta.

Locales	Bala más cercana (entre balas)	Bala más lejana	Garita de entrada (Bala más cercana)	Oficina de despacho	Oficina de control de técnico	Oficina general (Bala más cercana)	Área de llenado de las balas comerciales
Distancias Dentro de la planta (m)	3,5 – 4,6	25	12	8	6	16	18

Fuente: Elaboración propia

La nube explosiva de 194 m de largo, que se forma en dirección ENE para el mes de enero, resulta ser la que posee la menor zona correspondiente a una sobrepresión de 24,131 kPa, y aun así afectaría a toda a planta por las dimensiones de la misma (180 m), por lo que el análisis que se hace para medir la afectación sobre la planta es válido, para el resto de las nubes explosivas que serían de mayor tamaño. Debe recordarse que la zona roja de sobrepresión de 55,158 kPa no se forma en ninguno de los escenarios de las VCE.

El equipamiento que hay en la planta, así como las oficinas y otros locales sufrirán los siguientes daños.

- Rotura ocasional de ventanas de vidrio y pequeñas bajo tensión.
- Ruido molesto y fuerte.
- Presión típica de rotura de cristales.
- Umbral para la pérdida temporal de la audición.

- Rotura de losas, crujidos de los techos y las paredes.
- Demolición parcial de las casas.
- Colapso parcial de las paredes y los techos.
- Edificios con marcos de acero torcidos y empujados fuera de sus lugares.
- Ruptura de los tanques de almacenamiento de combustible.

3.4.3 Análisis de la influencia de la radiación creada por un BLEVE

Tabla 3.10: Resultados de las dimensiones de un BLEVE y las distancias a los consejos populares.

Balas de 200 m³			
Consejos Populares	Radiación	Radio de la zona (m)	Distancia de la fuente de emisión al área (m)
Playa	10	550	2760
	5	790	
	2	1215	
Pueblo Nuevo	10	550	3900
	5	790	
	2	1215	
Versalles	10	550	1320
	5	790	
	2	1215	
Reparto Dubroc	10	550	470

	5	790	
	2	1215	
Matanzas este	10	550	2410
	5	790	
	2	1215	
Matanzas oeste	10	550	3080
	5	790	
	2	1215	
Peñas Altas	10	550	3900
	5	790	
	2	1215	

Fuente: Elaboración propia.

La zona roja que representa la mayor radiación de un BLEVE no afecta a ninguno de los consejos populares, tampoco la zona naranja, solo la zona amarilla llega a alcanzar al Reparto Dubroc, y con un nivel de radiación que se considera inofensivo para las personas sin ningún tipo de protección.

3.4.4 Análisis de la influencia de la sobrepresión de una nube explosiva, con respecto a las instalaciones cercanas.

Tabla 3.11: Resultados de las dimensiones de una nube explosiva de GLP y su relación con las instalaciones cercanas.

Temperatura(°C)		32	Julio	
Nubosidad		6		
Humedad (%)		81		
Local	Direcci. del Viento	Vel. Media del Viento (m/s)	Sobrepresión (psi)	Distancia media de la fuente de emisión al área (m).
Oficina de la planta del frigorífico	E	1	AEGL-2(4.27)	84
Planta de conservas	N	1	AEGL-2(4.59)	84
Cámaras del Frigorífico	SW	1	AEGL-1(1.11)	96
Envase y despacho de balas de GLP	NW	1	AEGL-2(6.36)	67
Pto de venta del frigorífico	E	1	No afecta	167

Según se puede apreciar en los resultados anteriores la oficina de la planta del frigorífico, la planta de conservas, y el área de envase de balas de GLP, son alcanzadas por una sobrepresión de nivel 2, que según se especifica en las informaciones del *software*, van a ocasionar serias afectaciones y de acuerdo con el anexo 14 se producen rotura ocasional de ventanas de vidrio, demolición parcial de las oficinas, colapso parcial de las paredes y los techos, serán empujados fuera de sus lugares edificios y se producen además ruptura de tanques de almacenamiento.

Las Cámaras del Frigorífico, y el Punto de venta del frigorífico, quedan afectados por una sobrepresión de orden 1, es decir con daños leves.

3.5 Tipos de afectaciones personales provocadas por los diferentes escenarios

3.5.1 Afectaciones obtenidos por *Probit* para el escenario nube tóxica en la dirección del viento ENE

Los resultados que se muestran corresponden al origen de una TC desde una bala de 200 m³.

Tabla 3.12: Afectaciones obtenidas por *Probit* para el escenario nube tóxica.

Consejo Popular afectado	Concentración (ppm)	Valor de <i>Probit</i>	% afectados
Rpto. Dubroc	20,9	4,68	38

Fuente: elaboración propia

Las nubes tóxicas de GLP que se originarían, a partir de un escape accidental en Rayonitro, según los resultados obtenidos, no alcanzan a los consejos populares de la ciudad de Matanzas, con excepción de la zona del Reparto Dubroc que si llega a ser afectada ligeramente por un área de concentración correspondiente AEGL-1, de manera tal que sus pobladores se verán afectados moderadamente en su salud con trastornos respiratorios.

3.5.2 Afectaciones obtenidos por *Probit* para el escenario nube explosiva en la dirección del viento ENE

Tabla 3.13: Distancias de los diferentes locales a la fuente de emisión de un VCE.

Locales						
Bala más cercana (entre	Bala más cercana	Garita de entrada	Oficina de despacho	Oficina de control	Oficina general (Bala	Área de llenado de las balas

balas)	(entre balas)			de técnico	más cercana)	comerciales
Distancia						
3,5-4,6	25	8	12	6	16	18

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.14: Afectaciones por influencia de una sobrepresión de un VCE a los locales.

Lugar	Sobrepresión (N/m ²)	Afectaciones							
		Porcentaje de muerte por hemorragia pulmonar.		Porcentaje de afectados por rotura de tímpano		Porcentaje de muertes por desplazamiento y colisión del cuerpo contra obstáculos		Porcentaje de lesionados por desplazamiento y colisión del cuerpo contra obstáculos	
		Valor Pr	No. afect.	Valor Pr	No. afect.	Valor Pr	No. afect.	Valor Pr	No. afect.
Locales	3,5	-7	0	4	6 %	3	3 %	6	85 %

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la información de las distancias que se ofrece anteriormente es posible realizar el análisis de la afectación de este escenario, si se sabe además que todos ellos son afectados por la misma sobrepresión correspondiente a la zona de nivel dos. Ninguna otra zona llega alcanzar a estos locales.

La tabla anterior nos indica de acuerdo con los valores de *probit* y en correspondencia con el **Anexo 5**, que no se produce muerte por hemorragias pulmonares, que solo el 6 % de las personas que laboran en ese lugar se le afectan los tímpanos, y el 3 % muere por desplazamiento y colisión del cuerpo contra obstáculos, mientras que el 85 % de los presentes durante el accidentes son lesionados.

Tabla 3.15: Afectaciones obtenidos por *Probit* para el escenario BLEVE en la dirección del viento E.

Consejos Populares	Radiación (kW/m ²)	Afectaciones							
		Quemaduras mortales (con ropas de protección)		Quemaduras mortales (sin protección)		Quemaduras de segundo grado		Quemaduras de primer grado	
		Valor Pr	No. afect.	Valor Pr	No. afect.	Valor Pr	No. afect.	Valor Pr	No. afect.
Planta	10,4	12,6	100 %	13,5	100 %	15,7	100 %	19,0	100 %

Fuente: elaboración propia.

Mediante las dimensiones de la planta de GLP, y las dimensiones de este tipo de escenario, reportados en el **Anexo 11**, todas sus secciones se ven afectadas por una sobrepresión de 10,4 KW/m², lo que implica un 100 % de afectación en todos los sentidos. En los **Anexo 12** se muestran los resultados de las afectaciones obtenidas por *Probit* para el escenario BLEVE en los locales estudiados.

3.6 Estimación del impacto económico sobre la planta

De manifestarse cualquiera de estos escenarios, tendrán asociadas diferentes consecuencias sobre las instalaciones según se reporta en los **Anexos 13 y 14**, en esta ocasión la autora del trabajo decide ilustrar en relación con la ocurrencia de un BLEVE donde se combinan el efecto de la sobrepresión y del flujo térmico, que pueden dañar totalmente la instalación, por lo que además de las pérdidas ocurridas se requiere incurrir en un costo por reposición de los equipos.

Según se muestra en el **Anexo 15**, es posible estimar el costo de reposición a partir del costo del módulo simple, para cada equipo reponer mediante el *software* CAPCOST y una vez debidamente actualizados los mismos, se calculan otros costos asociados a ellos y finalmente el costo total por reposición de los mismos el cual asciende a \$ 11 727.

CONCLUSIONES

1. Se determinan las áreas que son afectadas ante posibles accidentes por escapes de GLP en la zona industrial de Matanzas y su entorno.
2. Una nube explosiva de GLP, por accidente químico en la planta de almacenamiento y distribución de GLP, afectaría solamente el consejo popular del Reparto Dubroc, pero si los locales cercanos a la planta de GLP y la propia planta.
3. La afectación a la población del reparto Dubroc por un nivel uno de riesgo, en el caso de la explosión de una nube de vapor, afecta solamente a los locales cercanos y a la planta, pero no a los consejos populares.
4. Un BLEVE destruye casi la totalidad de la planta, afecta seriamente a los locales cercanos y al reparto Dubroc.
5. Las afectaciones que se muestran a la salud humana en los cuatro escenarios estudiados deben considerarse serias.
6. La afectación económica por reposición de los equipos dañados asciende a \$ 11 727 444.

RECOMENDACIONES

1. Tener en cuenta los resultados para mejorar el plan de protección y evacuación del Reparto Dubroc ante la ocurrencia de cualquiera de estos escenarios.
2. Considerar en el plan de prevención y de evacuación los resultados que se obtienen en este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Committee for the Prevention of Disasters. (2018). *The Netherlands Organisation of Applied Scientific Research (TNO). "Methods for determining and processing probabilities". CPR 12E (Red Book).*
2. Hoja de seguridad Gas Licuado del Petróleo. (2019) TYGAS. Bogotá D.C.
3. Albornas, Y (2015). Characterization and uses of the "qualitative techniques" for hazard identification and assessment of chemical process industries. *Centro Azúcar, 42*, 3-12.
4. AOP, A. e. d. o. d. p. p. (2017). El petróleo. Fichas didácticas. España.
5. ARCOPOL. (2011). Manual de usuario ALOHA. Editorial METEOGALICIA-UE. Galicia.
6. Autores, C. d. (2017). Memoria, Guía para la selección y aplicación de técnicas PHA.
7. Avilés, D., & Rivera, M. Á. (2018). Dispersion of air pollutants by fixed sources of combustion. España.
8. Baysari, M. T., & McIntosh, A. S. (2018). Understanding the human factors contribution to railway accidents and incidents in Australia. *Accident Analysis and Prevention, 40*, 1750-1757.
9. Bestratén, M., & Turmo, E. (2019). Explosions BLEVE. Evaluation the radiation thermique BLEVE assessment of Thermal radiation. *Asuntos sociales de España, 29*, 1-10.
10. Carmenat. (2018). *Evaluación de Atmósferas peligrosas en el área de la Terminal-320 de la empresa Comercializadora de Combustibles Matanzas.* (Tesis presentada en opción al título de ingeniero químico), Universidad de Matanzas.
11. Carol, S. (2001). *A nine methodology for predicting the severity of industrial accidents.* (Tesis doctoral), Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. España.
12. Casal, J. (2002). *Análisis del riesgo en instalaciones industriales.* España: UPC.
13. Casal, J. (2008). *Evaluación de los efectos y consecuencias de accidentes mayores en plantas industriales.* España: Elsevier.

14. Castro, D., & Castro, K. (2014). Evaluación de atmosferas peligrosas en la Central Termoeléctrica Antonio Guiteras de Matanzas. Universidad de Matanzas.
15. Castro, R. (2019). The risk of chemical disaster as a public health issue *Salud pública*, 72, 1-20.
16. Civil., D. G. d. P. (1994). Guía técnica. Metodologías para el análisis de riesgos. Visión general. ISBN 84-8150-042-9. Ministerio de Justicia e Interior. *Madrid*.
17. Civil., S. d. P. (2002). Procedimiento de evaluación de riesgos tecnológicos en el entorno. *Barcelona*.
18. Díaz, A. (2013). *Análisis de riesgos en el área de almacenamiento de gas licuado del petróleo en la Empresa Comercializadora de Combustibles Matanzas (ECCM)*. (Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico), Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos.
19. 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 fin de grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales), Sevilla.
20. Doytchev, D. E., & Szwillus, G. (2018). Combining task analysis and fault tree analysis for accident and incident analysis: a case study from Bulgaria., *Accident Analysis and Prevention*., 22(28-60).
21. Fabbri, L. B., M Bruinen de Bruin, ((2017)). Accident Damage Analysis Module (ADAM) – Technical Guidance, EUR 28732 EN, 2017, ISBN 978-92- 79-71879-3, doi: 10.2760/719457.
22. Fernández, P. (2008). Gestión medioambiental y técnicas afines. Modelos de cálculo de efectos y análisis de consecuencias., 78.
23. Ferrero, F. (2018). *Incendios de hidrocarburos. Estudio de la formación y evolución del BOILOVER de capa fina*. (Tesis doctoral), Universidad politécnica de Cataluña.
24. García Brage, A. (2002). *Safety manual for chemical and oil plants*. España: Impresos y Revistas, S. A.
25. Gonzales, E., Duper, N., & Lorente, P. (2010). Accidentes industriales que originan nubes multicomponentes. *Seguridad y medioambiente*, 119, 22-33.

26. Hahnemann, A., Correa, C., & Rabbani, E. (2017). Evaluación de seguridad contra incendio: método alternativo aplicado a edificaciones brasileñas *ALCONPAT*, 72, 186-199.
27. Hardee, H. C., & Lee, D. O. (1975). The expansion of clouds from pressurized liquids. *Accident analysis and prevention*, 7, 91-102.
28. Henry, P., Gbirezyk, V., & Degezelle, V. (2016). *ALOHA: an innovative system for surveillance of hydraulic structures*. Paper presented at the 3rd European Conference on Flood Risk Management, Francia.
29. Hernández, A., Jáuregui, U., & González, J. A. (2017). Aplicaciones del modelo de diagnóstico meteorológico CALMET. *Revista Cubana de Meteorología*, 23, 122-140.
30. Jones, R., Lehr, W., Simecek-Beatty, R., & Reynolds, M. (2013). ALOHA: Areal Locations of Hazardous Atmosphere Estados Unidos.
31. Leiva, C., Alvarado, F., Camacho, A., Castillo, G., & Chin-Wo, A. (2017)
32. *Situación del GLP en Costa Rica*. Costa Rica: Ministerio del Ambiente y Energía Dirección Sectorial de Energía.
33. Lizarazo, R., & Cañas, D. (2018). Diseño conceptual de un vaporizador de gas natural licuado de una planta de regasificación en Colombia. *Met&Flu*, 48, 16-23.
34. Loi, D., & Meloni, P. (2018). Un marco arquitectónico consciente para un aprendizaje profundo en el borde. Italia.
35. López, J. (2017). *Análisis cuantitativo de riesgos de tuberías de transporte de sustancias peligrosas* (Grado en Ingeniería Química), Universidad de Barcelona.
36. Marhavidas, P. K., Koulouriotis, D. E., & Gemeni, V. (2011). Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000-2009., 24, 477-523.
37. Maurer, B. (1997). Modelling of vapour cloud dispersion and deflagration after bursting of tanks filled with liquefied gas. *Proceeding of 2nd International Loss Prevention Symposium, Frankfurt- European Federation of Chemical Engineers*, 25, 305-321.
38. Milner, H. (2016). CALMET modeling. Columbia Britanica.

39. Naranjo, L. (2019). *Determinación de las áreas de atmósferas peligrosas y su influencia en la UEB División Territorial de Comercialización de Combustibles Matanzas y su entorno.* (Tesis presentada en opción al título de ingeniero químico.), Matanzas.
40. Nolan, D. P. (2011). *Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for Oil, Gas, Chemical and Related Facilities.* Second edition. Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier. Washington
41. Piqué, T., & Cejalvo, A. (2016). *Análisis probabilístico de riesgos España.*
42. Poluyan, A., Meloni, P., Loi, D., & Deriu, G. (2019). *ALOHA: an architectural-aware framework for deep learning at the edge.* Paper presented at the Computer systems organization, Italia.
43. Reche Motos, M. I. (2017). *Los Accidentes Graves en la Industria Química. Análisis de la normativa seveso y nuevas propuestas* (Doctorado), Murcia.
44. Rednova. (2018). *Ficha técnica y hoja de datos de seguridad del glp España.*
45. Renau, J. M. (2013). *La Seguridad Industrial y el Análisis de Riesgos Una introducción al tema.* Universidad Rovira Virgili.
46. Reniers, G. L., Dullaert, W., & Soudan, K. (2015). *Developing an external domino prevention framework Hazwim., 18, 127-138.*
47. REPSOL. (2018). *Ficha de datos de seguridad del GLP.* Perú.
48. Safety., T. C. f. C. P. (Consultado 29 de enero del 2013.). *Process Safety Incident Database.* The American Institute of Chemical Engineers. [on-line] (<http://www.psidnet.com>).
49. Tamayo Pacheco, J. F. R., Salvador Jácome, J., & Vásquez Cordano, A. L. (2017). *La industria de los hidrocarburos líquidos en el Perú.* Lima, Perú: Osinergmin.
50. Tech, E. (2017). *Application of CALMET/CALPUFF and MESOPUFF II to Compare Regulatory Desing Concentrations for a Typical Long-Rangr Transport Analysis.* Massachusetts.
51. técnica., D. G. d. P. C. G. (1994). *Metodologías para el análisis de riesgos. Visión general.* ISBN 84-8150-042-9. Ministerio de Justicia e Interior. *Madrid.*

52. Venegas Vásconez, D., & Ayabaca Sarria, C. (2019). Analysis of storage in liquefied petroleum gas systems: stationary tanks vs. cylinders *Ingenius*, 22, 113-122.
53. Vílchez, J. A. (2016). Análisis de riesgos ambientales y aplicación al diseño de instalaciones industriales. . Trámites, Informes y Proyectos, S.L. Barcelona.
54. Villafañe Santander, D. (2013). *Estudio de la dispersión e incendio de nubes inflamables de gas (GNL y GLP)* (Doctor por la Universitat Politècnica de Catalunya), Politècnica de Catalunya.
55. Wells, G. (2003). *Majors Hazards and their management*. Gulf Publishing Company. Houston, Texas.
56. Zamora, A. (2017). Las actividades de la industria petrolera y el marco ambiental legal en Venezuela. Una visión crítica de su efectividad *Revista geográfica venezolana*, 51, 115-144
57. Zepeda Ramos, O., & González Martínez, S. (2014). Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México. *Cenaprend*, 28, 1-232.

ANEXOS

Anexo 1: Accidentes que involucran al gas licuado del petróleo (GLP).

Fecha	País y localidad	Origen del accidente
1970	Japón, Osaka	Explosión en un subterráneo
1972	Brasil, Duque de Caxias	Falla en el proceso
1973	EUA, Staten Island	Explosión
1974	EUA, Eagle Pass	Fuga
1978	Canadá, Ontario	Tubería
1978	México, Xilatopec	Explosión
1978	México, S. Magallanes	Explosión (tubería)
1978	Polonia, Warsaw	Fuga, explosión
1982	Italia, Todi	Explosión
1983	Egipto, Río Nilo	Explosión
1984	Brasil, Río de Janeiro	Fuga, incendio
1984	México, San J. Ixhuatepec	Explosión (almacenamiento)
1984	Paquistán, Gahri Dhoda	Explosión (tubería)
1986	México, Cárdenas	Fuga (tubería)
1988	China	Explosión
1989	URSS, Acha Ufa	Explosión (tubería)
1990	Tailandia, Bangkok	Fuga, incendio
1991	Tailandia, Bangkok	Explosión
1992	Corea, Kwangju	Explosión (almacén)
1992	Corea del Sur, Chongju	Incendio

1993	Venezuela, Tejerias	Explosión (alcantarillado)
1994	Francia, Courbevoie	Fuga
1994	Mozambique, Palmeira	Fuga
1994	Venezuela	Explosión
1995	Corea, Taegu	Fuga
1995	Indonesia, Cilapcap	Incendio, explosión (refinería)
1999	México, Guadalajara	Explosión
2002	México, Veracruz	Explosión
2004	Irán	Fuga
2006	México	Fuga
2006	México, Jalisco	Fuga
2006	México, Michoacán	Fuga
2007	México, Querétaro	Fuga
2007	México, Tamaulipas	Fuga
2007	México, Guanajuato	Fuga
2008	México, Chiapas	Explosión
2008	México, Sonora	Fuga
2008	México, Guanajuato	Incendio
2009	México, Villa Juana	Explosión
2009	Villa Aura, Santo Domingo Oeste	Incendio
2009	México, estado de Sonora	Incendio
2010	México	Fuga
2010	México, estado de puebla	Explosión

2011	Puente Juan Pablo Duarte, en Santo Domingo	Explosión
2011	Bávaro	Explosión
2012	Dominicana, Zona industrial de Haina	Escape
2012	Puerto Rico, Las Minas	Explosión
2012	México, Villa Juana	Incendio
2013	México, DF	Explosión
2013	Autopista cerca de la capital mexicana	Explosión de un camión cisterna
2013	Batey Caballona, en Santo Domingo Oeste	Explosión
2014	Autopista Duarte, Santiago	Incendio
2015	México, estado Tabasco	Explosión
2015	Punta Cana	Explosión
2016	Complejo Petroquímico en el puerto de Coatzacoalcos, estado Veracruz	Explosión
2016	México DF	Explosión

Anexo 2: Comportamiento de las variables climatológicas para la zona objeto de estudio.

Tabla 2a. Comportamiento de los valores medio de la **nubosidad** para la zona estudiada.

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
Media	4	4	4	3	4	5
coef.variac	17.9967	17.9967	13.845	15.1882	21.356	15.7135
desv.estand	0.7378	0.7378	0.5676	0.5163	0.8755	0.7071

MES	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Media	4	4	4	3	4	5
coef.variac	17.9967	17.9967	13.845	15.1882	21.356	15.7135
desv.estand	0.7378	0.7378	0.5676	0.5163	0.8755	0.7071

Fuente: Moya, (2010).

Tabla 2b Comportamiento de los valores medio de la **temperatura máxima** para la zona estudiada.

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
Media	26.15	25.92	28.2	29.71	30.94	30.54
coef.variac	2.6448	2.7808	1.3056	2.3929	2.1177	2.3972
desv.estand	0.6916	0.7208	0.3681	0.7109	0.6552	0.7321

MES	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Media	31.43	31.3	30.82	29.54	27.32	26.54
coef.variac	1.3668	1.5506	2.4842	2.3572	2.9726	2.6949
desv.estand	0.4295	0.4853	0.7656	0.6963	0.8121	0.7152

Fuente: Moya, (2010).

Tabla 2c: Comportamiento de los valores medio de la temperatura media para la zona estudiada.

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
Media	20.6	20.5	22.5	24.2	25.4	25.7
coef.variac	5.8109	3.5618	6.9811	4.9603	3.8464	4.3965
desv.estand	1.1361	0.6958	1.4942	1.1402	0.9288	1.0745

MES	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Media	26.3	26.1	25.5	24.6	22.7	21.2
coef.variac	2.6557	2.6354	3.7117	3.4507	6.3009	4.5940
desv.estand	0.6637	0.6546	0.8982	0.806	1.3587	0.9235

Anexo 3: Trabajadores de la UEB División Territorial de Comercialización de Combustibles Matanzas.

Áreas de la UEB.	Cantidad de Trabajadores.
Barrera	10
Terminal-320	35
Base de Crudo y Suministro	30
Planta de Gas Licuado	26
Mantenimiento	92
Base en Tierra	21
Muelle	49
Laboratorio	22
Oficinas:	
Marítimo	12
Dirección General	6
Seguridad y Protección	12
Despacho	16
Supervisión y Control	7
Atención al cliente	14
Dirección Técnica	3
Técnica y Desarrollo	9
Seguridad Industrial	11
Informática	5
Calidad	4

Economía	28
Recursos Humanos	16
Logística	53
Comercial	86
Coordinación	3
Inversiones	10

Anexo 4: Caracterización del GLP.

Nombre del producto: **Gas licuado del Petróleo (GLP).**

Formula Química: $C_n H_{2n + 2}$

Etiquetado de peligro (frases R y S) así como las que la identifican por otros efectos

R2/R3/R7/R10/R22/R25/R44/R52/R54/R55/R56.

Datos físicos

- ✓ Apariencia: Incoloro, Inodoro
- ✓ Punto de ebullición: del líquido a presión atmosférica en °C (-42 a 0) propano, butano
- ✓ Punto de fusión:(-187 a -138)
- ✓ Solubilidad: no
- ✓ Densidad: del líquido = (0,500 560) y la densidad relativa al aire =(1,52 a 2) propano, butano
- ✓ T L V -límite superior de inflamabilidad: (9,50 a 8,41)
- ✓ IPVS - Límite inferior de explosividad: (2,37 a 1,86)
- ✓ Punto de congelación: de líquido a presión atmosférica =(-187 a -138) °C
- ✓ Temperatura de Auto- inflamación:=(466 a 405) °C
- ✓ Coeficiente de expansión: se tiene información
- ✓ Temperatura de inflamación: propano (466 °C), Butano (405 °C)
- ✓ Biodegradabilidad: NO
- ✓ Corrosión: NO, el etil-mercaptano, que se adiciona actúa como inhibidor de corrosión.

Formas de control y mitigación en casos de desastres.

Productos o técnicas empleados en el control y mitigación en caso de desastre: existe una brigada de TSRUA, para actuar ante cualquier evento de este tipo.

Existencia del producto de control y mitigación en la entidad (especificar cantidad y capacidad de mitigación): extintores PQS, extintores de espuma, agua.

Peligros para la salud:

- ✓ Concentración permisible: ninguna
- ✓ Exposición permisible: ninguna
- ✓ Partes del cuerpo que afecta: ojos, sistema respiratorio y pulmones.
- ✓ Forma de entrada al organismo: vía respiratoria.

Toxicidad

Sustancia	Toxicidad							
	TA	I	SB	TDR	MG	CG	C	TR
Gas licuado	x	R,O,P				x		

Nota: En el caso de la irritación debe aclararse si es a los ojos (O), piel (P) o respiratoria (R).

1. Datos de reactividad.

- ✓ Reacción principal y reacciones secundarias: No se tiene información.
- ✓ Cinética de reacción: no se tiene información.
- ✓ Contaminantes producidos: no se tiene información.
- ✓ Reacciones de descomposición: no se tiene información.

2. Condiciones de almacenamiento y manipulación.

- ✓ Capacidad del recipiente: 8 de 100 m³ y 13 de 200 m³.
- ✓ Forma del recipiente: cilíndrico horizontal con cabezas semiesférica.
- ✓ Dimensiones del recipiente: 112 m³ (20 m de Longitud, 2,614 m de diámetro y 21 mm de espesor), 200 m³ (21 m de longitud , 3,40 m de diámetro y espesor 26 mm)
- ✓ Material de construcción: acero al carbono.
- ✓ Localización de la soldadura: Por rolos de chispa.
- ✓ Longitud de la soldadura: 3,5 cm.
- ✓ Protección del recipiente (interior o exterior): pintura impermeabilizante.

- ✓ Existencia de accesorios en el recipiente y su localización: Accesorios en la cabeza principal de cada bala (Válvulas para líquidos, del tipo Macho lubricado, para vapor del mismo tipo, chequeo , válvula de exceso de flujo , drenaje con válvula de globo).
- ✓ Instrumentos en la cabeza principal de cada bala: (Manómetro, termómetro, Rotoganje: indicador del nivel del líquido)
- ✓ Fecha de fabricación del recipiente: Balas URSS (1970), Balas USA (1950).

3. Condiciones de almacenamiento de la sustancia.

- ✓ Estado: Líquido
- ✓ Presión = 5 a 14 kg/cm².
- ✓ Temperatura =10 a 40 °C.

4. Tipo de averías producidas:

- ✓ No se han producido.

5. Características de los alrededores del recipiente.

- ✓ Tanques expuestos a condiciones ambientales.

6. Condiciones para su uso en el proceso.

- ✓ Uso en el proceso: Llenado de cilindros, llenado de pailas, llenado de barcos.

7. Fallos ocurridos en estos equipos al operar con estas sustancias

- ✓ Roturas de mangueras.

8. Material de construcción de los equipos donde es usada:

- ✓ Acero al carbono.

9. Longitud de tubería que conduce la sustancia desde el punto de almacenamiento hasta el equipo donde es usada.

- ✓ A bombas (30 a 100 m).
- ✓ A compresores (50 a 120 m).

10. Diámetro de la tubería

✓ URSS – seis pulgadas.

✓ USA – cuatro pulgadas.

11. Cantidad de accesorios:

✓ Cinco válvulas y cuatro Instrumentos.

12. Material de construcción de los accesorios y las tuberías.

✓ Acero y hierro.

13. Protección del sistema de tuberías

✓ Pintura impermeabilizante.

Anexo 4a: Clasificación de la sustancia (R, 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

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

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

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	Evítase 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

Fuente: Domínguez, (2014)

Anexo 5: 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

Anexo 6: Resultados del censo poblacional del año 2012 en los Consejos Populares de la ciudad de Matanzas.

Consejos Populares	Habitantes
Versalles	19 829
Reparto Dubroc	1360
Matanzas Este	17 769
Matanzas Oeste	23 980
Pueblo Nuevo	28 298
Peñas Altas	24 328
Playa	13 120

Anexo 7: Direcciones del viento de interés en función de los Consejos Populares que pueden verse afectados por escapes de GLP.

Consejos Populares	Habitantes	Dirección del viento más riesgosas	Dirección de mayor riesgo(evaluar)
Versalles	19 829	E, ESE,SE	E

Matanzas	41 749	E y ESE	ENE
Pueblo Nuevo	28 298	N,NE y ENE	NE
Peñas Altas	24 328	WNW,NW y NNW	NW
Playa	13 120	WNW,NW y NNW	NNW

Anexo 8: Resumen de las áreas de riesgos originadas por la explosión de una nube de vapor en los diferentes meses del año para balas de 200 m³.

Temperatura(°C)		32	Enero		
Nubosidad		5			
Humedad (%)		78			
Dirección del Viento	Vel Media del Viento (m/s)	Frecuencia	Sobrepresión (psi)	Largo (m)	Ancho (m)
E	4,28	15,7	8	-	-
			3,5	193	189,2
			1	363,3	193,5
ENE	4,69	9,1	8	-	-
			3,5	181	193,2
			1	356,8	205
NE	4,17	9,4	8	-	-
			3,5	198	204
			1	375,8	200
NW	3,47	0,4	8	-	-
			3,5	224	242
			1	424,1	235
NNW	3,72	1,1	8	-	-
			3,5	207	231
			1	395	235
ESE	3,97	4,0	8	-	-
			3,5	202	204
			1	386,8	200
S	2,94	3,5	8	-	-
			3,5	257	296
			1	454	285

Temperatura(°C)		32	Abril		
Nubosidad		4			
Humedad (%)		73			
Dirección	Vel	Frecuencia	Sobrepresión (psi)	Largo	Ancho

del Viento	Media del Viento (m/s)			(m)	(m)
E	4,28	15,7	8	-	-
			3,5	193	200
			1	373.4	199
ENE	4,69	9,1	8	-	-
			3,5	183	198
			1	351	196
NE	4,17	9,4	8	-	-
			3,5	200	201
			1	378	208
NW	3,47	0,4	8	-	-
			3,5	228	250
			1	414	243
NNW	3,72	1,1	8	-	-
			3,5	213	232
			1	399	228
ESE	3,97	4,0	8	-	-
			3,5	200	209
			1	382	197
S	2,94	3,5	8	-	-
			3,5	383	449
			1	569	459

Temperatura(°C)		32	Julio		
Nubosidad		6			
Humedad (%)		81			
Dirección del Viento	Vel Media del Viento (m/s)	Frecuencia	Sobrepresión (psi)	Largo (m)	Ancho (m)
E	4,28	15,7	8	-	-
			3,5	193	201
			1	369	206
ENE	4,69	9,1	8	-	-
			3,5	181	203
			1	349	202
NE	4,17	9,4	8	-	-
			3,5	200	218
			1	378	216
NW	3,47	0,4	8	-	-
			3,5	230	260
			1	424	241
NNW	3,72	1,1	8	-	-
			3,5	211	244
			1	401	240
ESE	3,97	4,0	8	-	-
			3,5	200	204

			1	382	224
S	2,94	3,5	8	-	-
			3,5	400	469
			1	582	455

Temperatura(°C)		Octubre			
Nubosidad					
Humedad (%)					
Dirección del Viento	Vel Media del Viento (m/s)	Frecuencia	Sobrepresión (psi)	Largo (m)	Ancho (m)
E	4,28	15,7	8	-	-
			3,5	191	192
			1	369	211
ENE	4,69	9,1	8	-	-
			3,5	172	187
			1	350	180
NE	4,17	9,4	8	-	-
			3,5	200	204
			1	382	199
NW	3,47	0,4	8	-	-
			3,5	228	256
			1	415	257
NNW	3,72	1,1	8	-	-
			3,5	209	230
			1	411	229
ESE	3,97	4,0	8	-	-
			3,5	200	211
			1	386	224
S	2,94	3,5	8	-	-
			3,5	400	452
			1	579	465

Anexo 9: Resultados de las dimensiones de una nube explosiva de GLP y las distancias a los consejos populares.

Enero-Balas de 200 m³				
Consejos Populares	Dirección del viento.	Sobrepresión. (psi)	Largo de la nube (m).	Distancia media de la fuente de emisión al área (m).
Playa	E	8	-	2760
		3,5	193	
		1	363,3	
Pueblo Nuevo.	ENE	8	-	3900
		3,5	181	
		1	356,8	
Versalles	NE	8	-	1320
		3,5	198	
		1	375,8	
Reparto Dubroc	NW	8	-	470
		3,5	224	
		1	424,1	
Matanzas este	NNW	8	-	2410
		3,5	207	
		1	395	
Matanzas oeste	ESE	8	-	3080
		3,5	202	
		1	386,8	
Peñas Altas	S	8	-	3900
		35	257	
		1	454	

Abril-Balas de 200 m³				
Consejos Populares	Dirección del viento.	Sobrepresión. (psi)	Largo de la nube (m).	Distancia media de la fuente de emisión al área (m).
Playa	4,28	8	-	3550
		3,5	193	
		1	373.4	
Pueblo Nuevo.	4,69	8	-	3740
		3,5	183	
		1	351	
Versalles	4,17	8	-	1920
		3,5	200	
		1	378	
Reparto Dubroc	3,47	8	-	280
		3,5	228	
		1	414	
Matanzas este	3,72	8	-	3080
		3,5	213	
		1	399	
Matanzas oeste	3,97	8	-	4210
		3,5	200	
		1	382	
Peñas Altas	2,94	8	-	5010
		3,5	383	
		1	569	

Julio-Balas de 200 m³				
Consejos Populares	Dirección del viento.	Sobrepresión. (psi)	Largo de la nube (m).	Distancia media de la fuente de emisión al área (m).
Playa	4,28	8	-	3550
		3,5	193	
		1	369	
Pueblo Nuevo.	4,69	8	-	3740
		3,5	181	
		1	349	
Versalles	4,17	8	-	1920
		3,5	200	
		1	378	
Reparto Dubroc	3,47	8	-	280
		3,5	230	
		1	424	
Matanzas este	3,72	8	-	3080
		3,5	211	
		1	401	
Matanzas oeste	3,97	8	-	4210
		3,5	200	
		1	382	
Peñas Altas	2,94	8	-	5010
		3,5	400	
		1	582	

Octubre-Balas de 200 m³				
Consejos Populares	Dirección del viento.	Sobrepresión. (psi)	Largo de la zona (m).	Distancia de la fuente de emisión al área (m).
Playa	4,28	8	-	2760
		3,5	191	
		1	369	
Pueblo Nuevo.	4,69	8	-	3900
		3,5	172	
		1	350	
Versalles	4,17	8	-	1320
		3,5	200	
		1	382	
Reparto Dubroc	3,47	8	-	470
		3,5	228	
		1	415	
Matanzas este	3,72	8	-	2410
		3,5	209	
		1	411	
Matanzas oeste	3,97	8	-	3080
		3,5	200	
		1	386	
Peñas Altas	2,94	8	-	3900
		3,5	400	
		1	579	

Anexo10: Afectación de una nube explosiva de GLP al entorno más cercano a la planta.

Temperatura(°C)		32	Julio	
Nubosidad		6		
Humedad (%)		81		
Local	Dirección del Viento	Vel. Media del Viento (m/s)	Sobrepresión (psi)	Distancia media de la fuente de emisión al área (m).
Oficina de la planta	E	1	AEGL-2(4.27)	84
Planta de conserva	N	1	AEGL-2(4.59)	84
Frigorífico	SW	1	AEGL-1(1.11)	96
Embace y despacho de balas de GLP	NW	1	AEGL-2(6.36)	67
Pto de venta del frigorífico	E	1	No afecta	167

Anexo11: Resultados de la extensión de las áreas de peligro para un BLEVE en balas de 200 m³ y el nivel de radiación para el radio medio de cada área.

Tipo de bala	Radiación (kW/m ²)	Radio del área(m)	Tiempo de duración. (min)
200 m ³	10	553	60
	5	780	
	2	1220	

Anexo 12: Afectaciones obtenidas por *Probit* para el escenario BLEVE, en los locales estudiados.

Radiación en los locales cercanos. (kW/m ²)	Afectaciones							
	Quemaduras mortales (con ropas de protección)		Quemaduras mortales (sin protección)		Quemaduras de segundo grado		Quemaduras de primer grado	
	Valor Pr	No. afect.	Valor Pr	No. afect.	Valor Pr	No. afect.	Valor Pr	No. afect.
10,4	12,6	100%	13,5	100%	15,7	100%	19,0	100%

Anexo 13: Efecto de la sobrepresión sobre las estructuras.

Sobrepresión (psi)	Daño
0,005	Se escucha un sonido que denota la ocurrencia de un suceso inusual.
0,02	Ruido molesto
0,03	Rotura ocasional de ventanas de vidrio bajo tensión.
0,04	Ruido fuerte
0,10	Rotura de ventanas pequeñas bajo tensión.
0,15	Presión típica de rotura de cristales
0,20	Umbral para la pérdida temporal de la audición

0,30	95% de probabilidad de que no ocurran serios daños.
0,4	Daños estructurales limitados menores como rotura de ventanas, rotura de losas y crujidos de los techos y las paredes.
0,7	Daños menores a la estructura de las casas.
1,0	Demolición parcial de las casas
1,2	40 % de daño en las estructuras
2	Colapso parcial de las paredes y los techos.
3	Edificios con marcos de acero torcidos y empujados fuera de sus lugares.
3,3	80 % de daños en las estructuras
3-4	Ruptura de los tanques de almacenamiento de combustibles.
5	Rotura de postes de electricidad y teléfono.
5-7	Destrucción completa de las estructuras cercanas
7	Se vuelcan los carros de tren cargados
10	100 % de daños

Anexo 14: Daño según flujo térmico recibido.

Radiación térmica kW · m ²	Efecto.
1,4	Se considera inofensivo para las personas sin ningún tipo de protección.
1,7	Mínimo necesario para causar dolor.
2,1	Mínimo necesario para causar dolor después de 1 minuto.
4,0	Suficiente para causar dolor con una exposición de 20 s; quemaduras de primer grado.
4,7	Causa dolor en 15-20 s, heridas después de 30s.
11,7	El acero fino parcialmente aislado puede perder la integridad mecánica.
12,5	100 % letal. La madera prende tras una larga exposición. Fusión del plástico en los cables eléctricos.

25	El acero fino aislado puede perder la integridad mecánica.
37,5	Suficiente para causa daño en cualquier equipo. Colapso de estructuras.

Fuente: Casal *et al.* (1996).

Anexo 15: Costo de reposición de los equipos dañados por un BLEVE.

Equipos principales	Número de equipos	Costo individual del equipo (\$)	Coso total del tipo de equipo.	Costo actualizado
Balas de 100 m ³	8	206131	1 649 048	2 110 780
Balas de 200 m ³	13	312600	4 063 800	5 201 664
Bombas Centrifugas P succión 19 barg Potencia 0,4Kw	5	9400	47 000	60 160
Compresores Centrifugal Compressor/Blower Potencia 5,72 Kw	2	1230	2 460	3148
Total			5 762 308	7 375 752

Otros costos de la instalación	% del valor de los equipos principales	Costo (\$)
Tuberías +accesorios	12	885 090
Obra civil(Oficinas)	15	1 106 362
Envases y otros equipos	8	590 060
Total		4 351 692

Nota: El costo total por reposición de los equipos, se tiene en cuenta el costo del módulo simple solamente, asciende a \$11 727 444.

