

Universidad de Matanzas

Sede "Camilo Cienfuegos"

Facultad de Ciencias Técnicas

Departamento de Química



TRABAJO DE DIPLOMA

*Tesis presentada en opción al título de ingeniero
químico.*

Título: Evaluación del impacto ambiental y humano por incendio y explosión en la Planta de Gas Licuado de la División Territorial de Comercialización de Combustibles de Matanzas DTCCM.

Autora: Annely C. Polledo González

Tutores: Ing. Santiago Díaz Suárez MSc

Matanzas, Cuba, 2021

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo, Annely C Polledo González, declaro que soy la única autora de este Trabajo de Diploma y lo pongo a disposición de la UEB División Territorial de Comercialización de Combustibles Matanzas y de la Universidad de Matanzas, para hacer uso del mismo con el objetivo y finalidad que se estime conveniente.

Annely C. Polledo González

Pensamiento

“No se puede pasar un solo día sin tener un impacto en el mundo que nos rodea. Lo que hacemos marca la diferencia, y tenemos que decidir qué tipo de diferencia queremos hacer.”

Jane Goodall.

Dedicatoria

A mi Ana querida

A mi papá

A mis abuelos Reynol y Flora

A mi hermana Annalien

A mis hermanos Leticia, Osmy y Daimely

A mi primor

A mi tía la poderosa

A mi Ariel

En fin a toda mi familia.

Agradecimientos

A Dios, que no se puede dejar pasar por alto, por permitir que pudiera llegar hasta aquí ayudándome a atravesar este largo camino.

A mi mamá, mi Anita, que con sus majaderías y sin importar que, siempre me fue guiando en este camino tan largo y a veces difícil.

A mi papá quien estuvo ahí para darle solución a muchos de mis problemas.

A mi querida hermana Annalien, que a pesar de estar lejos siempre estuvo ahí para mí a través de la distancia.

A mi linda hermana Leticia que con sus locuras y enseñanzas aportó su granito de arena para que al fin pudiera llegar a donde estoy.

A mi hermanote, Osmey, a quien quiero mucho.

A mi primor, que a pesar de siempre nuestras desavenencias, me ha apoyado en el transcurso de mi carrera.

A mi tía, la poderosa, que me ha ayudado muchísimo para alcanzar mis logros.

A mi padrastro que también aportó su granito de arena para contribuir a lo largo de mi carrera.

A mi Ariel, mi majadero, que siempre ha estado a mi lado siendo mi apoyo y dándome ánimo cuando me desaliento.

A mis compañeras de cuarto que a pesar de todo siempre fueron un gran sostén para mí.

A mis vecinos de toda la vida que de una forma u otra me han apoyado en el transcurso de esta tarea.

A mi tutor Santiago, que a pesar de mis majaderías me ha ayudado con mucha paciencia.

A todos los profesores que de una forma u otra contribuyeron en mi formación.

En fin, agradezco a todas las personas que hicieron posible que este trabajo fuera un hecho.

A todos muchísimas Gracias.

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo evaluar el impacto ambiental y humano que provocan los accidentes de incendio y explosión en la División Territorial Comercialización de Combustibles de Matanzas. En esta investigación se hace uso análisis *Probit* y el Modelo de Evaluación del Impacto Ambiental (EIA), propuesto por Conesa (2000), para determinar el alcance de las afectaciones sobre el personal de la planta y la población cercana a la misma, además de las infraestructuras involucradas y el medio ambiente. También se pone en práctica el uso de la versión 5.4.7 del software ALOHA para la simulación de dichos accidentes. Los principales resultados de esta investigación están encaminados a proporcionar una mejor preparación y entrenamiento ante situaciones de emergencia al personal encargado y a la selección de las herramientas idóneas que cuantifiquen los daños sobre el entorno y las personas originado por los escenarios de incendio y explosión en la en la Planta de Gas Licuado del Petróleo (GLP).

Abstract

The objective of research is to evaluate the environmental and human impact caused by fire and explosion accidents in the Territorial Fuel Marketing Division of Matanzas. In this research, Probit analysis and the Environmental Impact Assessment Model (EIA), proposed by Conesa (2000), are used to determine the extent of the effects on the plant personnel and the population close to it, in addition to the infrastructure involved and the environment. The use of version 5.4.7 of the ALOHA software is also put into practice to simulate these accidents. The main results of this research are aimed at providing better preparation and training for emergency situations to the personnel in charge and the selection of the ideal tools that quantify the damage to the environment and people caused by fire and explosion scenarios in the Liquefied Petroleum Gas Plant (LPG).

Índice

Resumen.....	VII
Abstract.....	VIII
Introducción.....	1
Capítulo 1: Revisión bibliográfica	3
1.1 Gas licuado del petróleo. Composición y orígenes.	3
1.1.1 Aplicación del gas licuado de petróleo.....	4
1.1.2 Características y propiedades del GLP	4
1.1.3 Equivalente y término energético del GLP.....	5
1.1.4 Formas de comercialización	5
1.1.5 Impacto ambiental	6
1.1.6 Riesgos que puede ocasionarse por escape GLP.....	6
1.2 Diferentes tipos de escenarios de incendio y explosión. Características.	7
1.2.1 Incendios	7
1.2.3 Explosiones	11
1.3 Herramientas para cuantificar los daños ambientales y humanos que ocasionan los accidentes de incendios y explosiones	14
1.3.1 Herramientas para cuantificar los daños ambientales que ocasionan los incendios y las explosiones.....	15
1.3.2 Herramientas para cuantificar el impacto humano de los incendios y las explosiones.....	18
1.4 Software ALOHA.....	23
1.5 Conclusiones Parciales	23
Capítulo 2: Materiales y Métodos.	25

2.1	Caracterización de la planta de gas licuado del petróleo.	25
2.1.1	Descripción del proceso.	26
2.2	Procedimiento de identificación de la sustancia involucrada en el proceso.....	28
2.2.1	Consideraciones relacionadas con el escenario de incendio y el estado de agregación de la sustancia.	30
2.3	Metodología general de investigación.	31
2.4	Características y particularidades del <i>software</i> ALOHA.....	31
2.5	Método " <i>Probit</i> ".	38
2.6	Estimación de las pérdidas de recursos físicos y económicos por concepto de incendio y explosión.	41
Capítulo 3: Análisis de los resultados.....		43
3.1	Análisis para la selección de los escenarios de esta investigación.	43
3.2	Establecimiento de las condiciones de trabajo con el <i>software</i>	44
3.3	Análisis de los resultados del software ALOHA.	45
3.3.1	Determinación del alcance del escenario <i>Jet Fire</i> para ambos tipos de bala, 100 y 200 m ³	45
3.3.2	Afectación de la radiación de un <i>Jet Fire</i> en la propia Planta de GLP. 47	
3.3.3	Determinación del alcance y afectaciones de la radiación del escenario <i>BLEVE</i> para ambos tipos de bala, 100 y 200 m ³ en la propia Planta de GLP. En estado de calma.	50
3.3.4	Determinación del alcance del escenario VCE, para ambos tipos de bala, 100 y 200 m ³ . En estado de calma.....	54
3.3.5	Afectación de la sobrepresión de una VCE en la propia Planta de GLP. Estado de calma.	57
3.3.6	Efectos de la sobrepresión de la VCE sobre los equipamientos y las edificaciones de la planta.	60

3.3.7 Estimación del impacto económico sobre el equipamiento y la planta.	60
3.4 Conclusiones parciales	61
Conclusiones.....	62
Recomendaciones.....	63
Bibliografía	64
Anexos.	70

Introducción

A medida que pasa el tiempo aumenta en gran medida el desarrollo industrial en el mundo; con el afán de satisfacer nuestras necesidades se acrecienta cada vez más el progreso de la actividad que despliega la industria química y con ello la utilización de sustancias nocivas, que por una mala manipulación o tratamiento, podría causar un impacto irremediable a los recursos humanos y al medio ambiente debido a su elevado nivel de inflamabilidad y volatilidad.

En muchas instalaciones y actividades industriales existe la posibilidad de que ocurran determinados accidentes graves. Estos accidentes suelen ir asociados a la manipulación, producción, almacenamiento y transporte de materiales peligrosos. Dada la posibilidad de que sus efectos puedan afectar a áreas relativamente extensas, pueden tener consecuencias sobre las instalaciones, sobre las personas y sobre el entorno. (Vílchez, 2016; Villafañe, 2013).

Muchos autores plantean que los accidentes químicos son las peores formas de contaminación ambiental que existen, ya que, en un breve período de tiempo ocurre un deterioro considerable de la calidad ambiental debido a los gases que se generan, de ahí la necesidad de procurar que estos sean minimizados y que de alguna manera u otra sean cuantificados sus daños. (Abbasi *et al.* y Dueñas, 2018).

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, es uno de los centros destinados a la recepción, comercialización y almacenamiento de combustibles. Dicha instalación tiene como política un ambiente de trabajo seguro y de bienestar físico-mental para todos los trabajadores creando las condiciones, capacidades y cultura para desarrollar la actividad laboral de forma eficiente. Sin embargo, como toda instalación de este tipo, se encuentra expuesta a riesgos químicos, por lo tanto ha sido objeto de estudio durante 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 y sus consecuencias para el entorno y las personas presentes en la entidad.

El presente trabajo de diploma va orientado a la evaluación del impacto ambiental y humano por incendio y explosión de la UEB, por lo antes expuesto se plantea el siguiente **Problema científico**:

¿Cómo estimar los daños sobre el entorno y las personas originado por los escenarios de incendio y explosión en la en la Planta de Gas Licuado del Petróleo (GLP) de la División Territorial de Comercialización de Combustibles de Matanzas?

Para lo cual se ha definido como **Hipótesis**:

Si se realiza una evaluación, sobre el entorno y las personas, mediante herramientas adecuadas para cuantificar el impacto de posibles accidentes por incendio y explosión se podrán determinar los daños provocados por los mismos al medio ambiente y a los recursos humanos.

Objetivo general: Evaluar el impacto sobre el entorno y las personas al originarse accidentes de incendio y explosión en la Planta de Gas Licuado de la DTCCM.

Objetivos específicos:

Estimar el alcance de los posibles escenarios relacionados a incendios y explosiones.

Determinar las herramientas más eficaces que cuantifiquen el impacto ambiental y humano producto de accidentes relacionados a incendio y explosión.

Pronosticar el deterioro de la calidad ambiental por concepto de estos accidentes.

Capítulo 1: Revisión bibliográfica

En este primer capítulo se presenta la fundamentación teórica de este trabajo, en la cual se realiza una breve reseña de lo que es el gas licuado y sus propiedades. Se estudian los accidentes por incendio y explosión que pueden estar relacionados con la industria química, así como el impacto que los mismos pueden tener. Finalmente se presentan las distintas herramientas que se pueden usar para cuantificar estos daños ambientales y humanos.

1.1 Gas licuado del petróleo. Composición y orígenes.

El gas licuado de petróleo (GLP), denominado por las siglas en inglés *Liquefied Petroleum Gas*, es un producto formado en el primer paso del proceso de refinado del petróleo o también pueden encontrarse formando parte del gas natural (derivado del petróleo). Está constituido principalmente por hidrocarburos de tres y cuatro átomos de carbono que, a temperatura ambiente y a presión atmosférica, se encuentran en fase gaseosa y a presiones relativamente bajas pasan a fase líquida. Además, se puede encontrar etano, propileno, isobutanos e isobutenos, trazas de etano entre otros. Esta proporción está regulada en las especificaciones de cada país.

Desde el punto de vista comercial los principales hidrocarburos del GLP son el propano y el butano. En la figura 1.1 se muestra la estructura molecular del GLP.



Figura 1.1: Estructura molecular del GLP comercial.

Descalzi (2008) y Di Pelino (2003), plantean que GLP existió desde los inicios de 1900 y en aquella época sustituyó a la leña para calefacción y cocción de los habitantes. Sin embargo, no fue hasta 1940 cuando comenzó a cobrar fuerza e importancia como combustible, principalmente en Europa.

1.1.1 Aplicación del gas licuado de petróleo.

El gas licuado de petróleo GLP se utiliza generalmente como combustible, aunque muchos estudios consideran que más del 50% del consumo mundial se encuentra en el sector doméstico. Además el GLP reúne excelentes características que propicia su comercialización. Tales como: su gran poder calorífico, por ser su combustión fácilmente regulable, por ser limpia y producir escasa contaminación por su bajo contenido de azufre, no es corrosivo y a su vez es un producto fácil para su transportación.

1.1.2 Características y propiedades del GLP

El gas licuado del petróleo es un producto que dependiendo de sus condiciones de presión y temperatura, o de los componentes que lo forman puede, encontrarse en estado líquido o gaseoso. Es un producto inodoro, por ello se le agrega un odorante (etil o metil-mercaptano) para que sea detectable en caso de escape. La proporción etil o metil-mercaptano: 12 m³ a 17 g/m³ (14 ppm a 20 ppm), 0.45 kg por 37.9 m³ en GLP líquido.

Por otro lado, en la tabla 1.1 evidencia algunas de las propiedades del GLP

Tabla 1.1: Propiedades del GLP

Propiedades	Propano	Butano
Fórmula química	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀
Punto de ebullición a P atm (°C)	- 42	0
Densidad de los vapores (Aire=1)	1.5	2.01
Densidad del líquido a 15.4 °C (Agua=1)	0.504	0.582
Poder Calorífico Superior Líquido (kcal/kg)	12.023	11.878
Poder Calorífico Superior Gas (kcal/Nm ³)	23.400	30.700
Expansión volumétrica (vol gas/ vol liq) a 0 °C	273	233
Límite de inflamabilidad	2.4 – 9.6	1.9 – 8.6
Aire requerido para la combustión por m ³ de gas (m ³)	23.87	31.03

Efecto de la temperatura: Di Pelino (2002) planteo que: para obtener líquido a presión atmosférica (1 atmósfera y 20°C), la temperatura del butano debe ser

inferior a $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la del propano a $-42,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. En cambio, para obtener líquido a temperatura ambiente, se debe someter al GLP a presión. Para el butano, la presión debe ser de más de 2 atmósferas mientras que para el propano, la presión debe ser de más de 8 atmósferas.

Al aumentar la temperatura del GLP que se encuentra dentro de un tanque cerrado, aumenta su presión. Esto es debido a que aumenta la presión de vapor y, además, el líquido se expande. Por lo tanto, nunca se debe calentar un recipiente que contiene GLP y tampoco se debe llenar totalmente un recipiente con GLP líquido, sino que se debe dejar un espacio de por lo menos el 15% del volumen total del recipiente para la dilatación del líquido (Di Pelino *et al.* 2002).

Densidad: La densidad y presión de vapor del GLP varían según la composición. La densidad y peso específico son mayores que el aire, por lo que el GLP resulta más pesado que éste. Por lo tanto una nube de GLP tenderá a permanecer a nivel del suelo. El GLP líquido es más liviano y menos viscoso que el agua, por lo que hay que tener cuidado ya que puede pasar a través de poros donde ni el agua, gasoil o kerosene pueden hacerlo (Di Pelino *et al.* 2002).

Para una mejor comprensión de las características y propiedades del gas licuado de petróleo se puede dirigir al anexo 1.

1.1.3 Equivalente y término energético del GLP

Se considera que para 1 kg de GLP es equivalente a $1,28\text{ m}^3$ de Gas Natural; 1,33 litros de gasoil, 1,33 litros de Fuel Oil, 2,3 kg de carbón o 4 kg de leña. Y para un litro de líquido se transforma en 272,6 litros de gas para el propano y 237,8 litros de gas para el butano.

1.1.4 Formas de comercialización

Debido a su propiedad de licuable, el GLP se comercializa ampliamente de diversas formas tales como:

- Buques de GLP
- Camiones tanque
- Redes de distribución

- Poliductos
- Cilindros y garrafas

1.1.5 Impacto ambiental

Todos los combustibles (carbón, petróleo, gas natural y gas licuado) liberan contaminantes a la atmósfera cuando se queman para proveer energía. Sin embargo, el gas licuado (GLP) es uno de los más amigables ambientalmente de los combustibles. (Rojey *et al.* 1997). No es tóxico y no tiene ningún impacto sobre el suelo, aguas y faldas. Contribuye a mejorar la calidad del aire porque ayuda a la reducción de las emisiones de CO₂, produce una menor cantidad de particulado NO_x de gasóleo, no genera emisiones de SO₂ dióxido de azufre, contribuyendo a la no ocurrencia de la lluvia ácida. En adición el propano y el butano no son gases de efecto invernadero por lo que no contribuyen al calentamiento global.

1.1.6 Riesgos que puede ocasionarse por escape GLP

Son muchos los riesgos que puede provocar un escape de GLP, ya sea por manipulación, almacenaje o por trasiego de línea. Por las características de incoloro y su densidad, este en caso de escape, flotará sobre la superficie antes de evaporarse, forma mezclas inflamables con el aire en concentraciones que oscilan aproximadamente entre el 2 y el 10 por ciento, esto es el escenario propicio (nube de gas inflamable) para que ocurra una explosión y simultáneamente un incendio. El Manual práctico de Control de Riesgos de accidentes mayores del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 1999) establece que los riesgos más comunes de incendio o de explosiones se reporta en la utilización del GLP. Dentro de los principales **daños que genera un escape de GLP** se encuentran:

- Altas concentraciones: genera vapor de GLP, formando una nube tóxica dado a su característica de analgésico y asfixiante por la reducción de oxígeno.
- Genera graves quemaduras frías a la piel, debido a su rápida evaporación y a la consiguiente disminución de la temperatura.
- GLP presurizado: genera una vaporización instantánea, que puede arrastrar algunas gotas de líquido, una parte del líquido puede

evaporarse y la otra puede formar un charco que podría continuar la vaporización por absorción de calor por el suelo. (Vílchez *et al.* 2016)

Dado a lo expuesto anteriormente se hace necesario conocer los tipos de riesgos que más se originan en la industria y la frecuencia que ocurren los mismos.

1.2 Diferentes tipos de escenarios de incendio y explosión. Características.

Los riesgos industriales suelen estar relacionados con la posibilidad de incendio, explosión o dispersión de sustancias químicas tóxicas, y por lo general entrañan el escape de material de un recipiente, seguido: en el caso de sustancias volátiles, de su evaporación y dispersión. (Casal, 2002; PNUMA, 1999).

1.2.1 Incendios

Un incendio es una reacción química de oxidación - reducción fuertemente exotérmica, siendo los reactivos el oxidante y el reductor. En terminología de incendios, el reductor se denomina combustible y el oxidante, comburente; las reacciones entre ambos se denominan combustión. Para que un incendio se inicie es necesario que el combustible y el comburente se encuentren en espacio y tiempo en un estado energético suficiente para que se produzca la reacción entre ambos con gran desprendimiento de calor. Es uno de los accidentes industriales más comunes (Azari *et al.*, 2017; Duarte, 2009; Vipin *et al.*, 2018)

Los incendios se producen en la industria con más frecuencia que las explosiones y las emanaciones de sustancias tóxicas, aunque las consecuencias medidas en pérdida de vidas humanas suelen ser menos graves. No obstante, si se retrasa la ignición de un material inflamable que se escapa, puede constituirse una nube de vapor de material inflamable no encerrada. (PNUMA, 1999,). Sus efectos pueden ser terribles, puesto que la radiación térmica puede afectar a otras partes de la planta y generar nuevos accidentes como explosiones y escapes. Además, el humo puede, complicar notablemente la actuación de las personas, que conforman los equipos de

intervención, y someterlas a un peligro adicional como la falta de visibilidad o intoxicación. (Aboud, 2008; Casal *et al.*, 2002; Wells, 2003).

En el PNUMA (1999), se expone que los incendios pueden adoptar varias formas diferentes, entre ellas se pueden mencionar:

Un incendio de surtidor o chorro podría surgir cuando una larga llama estrecha procedente, por ejemplo, de una tubería de gas inflamado desde un escape.

Un incendio de depósito se produciría, por ejemplo, si una fuga de petróleo bruto de un depósito situado dentro de un muro de protección se inflamara.

Un incendio repentino podría organizarse si un escape de gas llegara a una fuente de combustión y se quemara rápidamente regresando a la fuente del escape.

Las explosiones provocadas por la ebullición de líquidos que expanden vapor son comúnmente mucho más graves que los demás incendios.

Los incendios son fenómenos de tipo térmico; Casal *et al.* (2002) plantea que estos se determinan como:

- **Borbollón (*Boilover* o *sloper*).**

Puede producirse generalmente en depósitos que contienen mezclas de diversos hidrocarburos. Si en uno de estos depósitos se produce un incendio, que puede durar horas, la capa superficial de hidrocarburo se va calentando debido a la radiación del incendio.

No todos los combustibles son susceptibles de experimentar el fenómeno del *boilover*, en general éste está asociado a aquellos compuestos por una serie de componentes con una amplia gama de temperaturas de ebullición (un buen ejemplo lo constituye el crudo de petróleo). Sin embargo, también es posible, si bien es mucho menos frecuente, el *boilover* con hidrocarburos puros. En todo caso, lo que si es necesario es que la temperatura de ebullición del combustible sea superior a la del agua (Casal *et al.*, 2002).

Para que se produzca el *boilover* es necesario que se cumplan tres condiciones: presencia de agua en el recipiente, generación de una ola de calor, es decir, existencia de una amplia gama de volatilidades en los componentes presentes en el depósito y que la viscosidad del hidrocarburo sea

suficientemente elevada para dificultar el paso del vapor. (Casal *et al.*, 2002; SHOUGESA, 2013; Mitropetros y Nwabueze, 2016; Whemeier, 2016).

- **Incendio de charco (*pool fire*).**

Combustión estacionaria con llama de difusión del líquido de un charco de dimensiones conocidas (extensión), que se produce en un recinto descubierto. (Casal *et al.*, 2002). El suceso que desencadena en este tipo de incendio es el vertido de un líquido inflamable que se extenderá sobre el suelo alcanzando un espesor reducido o, si existe una zona de contención, formando un charco de mayor profundidad. Además afirman que se trata de un caso en el que el incendio se produce en una condición abierta, es decir, no presurizada. (Piedra y Valdivieso, 2013)

El incendio de charco o piscina de fuego, como también se le conoce, ocurre una vez que se produce una rotura en una línea que transfiere un fluido líquido y este a su vez se derrama. Cuando ocurre la evaporación instantánea del producto derramado, se puede originar una nube inflamable, la cual entra en ignición y posteriormente ocurre el incendio del producto que permanece esparcido sobre la superficie. (Piedra y Valdivieso, 2013). El factor que más influye sobre el desarrollo de un accidente de este tipo es el tamaño del charco, expresado en términos de diámetro equivalente. (Ferrero, 2006).

- **Dardo de fuego (*jet fire*).**

Tiene lugar cuando se produce el vertido accidental de vapores o gases inflamables a presión, en áreas de proceso o depósitos de almacenaje. Incendios de características similares son muchas veces intencionados. Se utilizan para eliminar los gases no deseados que se generan durante la extracción del petróleo (antorchas de producción) o en refinerías y petroquímicas, para evacuar subproductos no deseados o gases emitidos a través de válvulas de seguridad (antorchas de proceso). Es la llama estacionaria y alargada (de gran longitud y poca amplitud) provocada por la ignición de un chorro turbulento de gases o vapores combustibles. Estos producen normalmente al aire libre. Un ejemplo típico es el soplete. (Casal *et al.*, 2002; Piedra y Valdivieso, 2013).

- **Llamarada (*flash fire*).**

Llama progresiva de difusión, de baja velocidad. No produce ondas de presión significativas. Suele estar asociada a la dispersión de vapores inflamables a ras de suelo. Cuando éstos encuentran un punto de ignición, el frente de la llama generada, se propaga hasta el punto de emisión, barriendo y quemando toda la zona ocupada por los vapores en condiciones de inflamabilidad. Si el origen de los vapores es un vertido con evaporación, el fenómeno acaba en un incendio de charco. Estas nubes pueden estar originadas también por el vertido de un líquido que en condiciones atmosféricas experimente un flash o que se evapore muy rápidamente. En el caso de los gases licuado del petróleo: si se produce un escape se formará un charco que se evaporará rápidamente formando una nube. Este suceso se trata como si fuera un escape continuo de vapor a la atmósfera. Los incendios de nubes de vapor tienen una duración muy corta. (Casal *et al.*, 1999).

- **BLEVE-Bola de fuego.**

Acrónimo de la expresión inglesa *Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion*. Este escenario se refiere a la bola de fuego (*fireball*) que se produce por el estallido súbito y total, por calentamiento externo, de un recipiente que contiene un gas inflamable licuado a presión, cuando el material de la pared pierde resistencia mecánica y no puede resistir la presión interior. El calentamiento extremo es generalmente producido por un incendio de charco o de dardo de fuego, y la probabilidad de que estalle es especialmente elevada en los casos en los que hay un contacto directo de la llama con la superficie del recipiente. (Casal *et al.*, 2002).

Para Ferrero (2006), las bolas de fuego desprenden una radiación térmica muy fuerte y pueden alcanzar centenares de metros. La misma tiene una duración de 5 a 30 segundos, por lo que normalmente no produce daños estructurales graves a edificaciones, sin embargo, puede perjudicar gravemente a las personas.

En este escenario resulta muy difícil improvisar acciones adecuadas para controlar una emergencia que puede conducir a un accidente de este tipo. Cualquier actuación que requiera la presencia humana será muy arriesgada,

porque no se puede prever en qué momento se producirá la explosión. Por ello, las acciones deben ser preventivas. (Bestratén, 1996).

1.2.3 Explosiones

Se puede definir una explosión como una liberación repentina de energía, que genera una onda de presión que se desplaza alejándose de la fuente mientras va disipando energía. (Casal *et al.*, 1999; Wells, 2003 y Zhou *et al.*, 2016). Esta liberación tiene que ser, no obstante, bastante rápida y concentrada para que la onda que se genera sea audible. No es necesario, pues, que se produzcan daños para poder considerar este fenómeno como explosión. La energía liberada puede haber sido almacenada inicialmente bajo una gran variedad de formas: nuclear, química, eléctrica o de presión. (Casal *et al.*, 1999).

Las explosiones se caracterizan por una onda de choque que puede producir un estallido y causar daños a los edificios, romper ventanas y arrojar materiales a varios cientos de metros de distancia. Las lesiones y los daños son ocasionados primeramente por la onda de choque. Aunque los efectos de la presión excesiva pueden provocar directamente la muerte, es probable que esto sólo se produzca con las personas que trabajan muy cerca del lugar del suceso. (PNUMA, 1999).

Se plantea que las explosiones pueden producirse en dos forma, en función de la velocidad de combustión durante la misma:

- Deflagración: cuando la velocidad de combustión o la velocidad de la llama son relativamente lentas, del orden de 1 m/s con una presión máxima de 70-80 kPa.
- Detonación: la velocidad de la llama es extremadamente elevada. El frente de la llama se desplaza como una onda de choque, con una velocidad normal de 2 000 a 3 000 m/s. La misma puede alcanzar fácilmente una presión de 200 kPa.

Casal *et al.* (1999), explica que las explosiones junto a los incendios, las nubes tóxicas y la dispersión de productos radioactivos forman parte de los denominados riesgos mayores más comunes que podemos citar. Estas son fenómenos de tipo mecánico y se pueden determinar por:

- **Explosión de una nube de vapor inflamable no confinada (UVCE).**

Acrónimo de la expresión inglesa *Unconfined Vapor Cloud Explosion*. Este tipo de explosión química involucra una cantidad importante de gas o vapor en condiciones de inflamabilidad, que se dispersa por el ambiente exterior. Para que esto ocurra, a grandes rasgos, la cantidad de gas tiene que superar el valor de algunas toneladas. Cuando no es así, normalmente la ignición de la masa de vapor deriva en una llamarada sin efectos mecánicos importantes. En general, este tipo de accidentes se asocia a situaciones que determinan el escape masivo de gases licuados, gases refrigerados y líquidos inflamables muy volátiles (con una intensa evaporación), ya que en estas circunstancias se pueden generar una gran cantidad de vapores inflamables en un breve período de tiempo.

Por otra parte, el problema principal de este tipo de explosiones proviene del hecho que, además del alcance que puede llegar a tener la nube, la ignición de esta puede producirse en un punto alejado de la fuente origen del vertido y afectar a grandes áreas (Casal *et al.*, 1999).

- **Explosión de vapor confinado (VCE).**

Acrónimo de la expresión *Confined Vapor Explosion*. Tipo de explosión química que involucra gases inflamables en condiciones de confinamiento (total o parcial). Normalmente se asocia a explosiones derivadas de la combustión en recintos cerrados de vapor inflamable como naves industriales, salas de almacenamiento, cámaras de aire de depósitos, sistemas de drenaje contaminados por productos volátiles, etc. (Casal *et al.*, 1999).

Plantea Velásquez (2009), que “este escenario ocurrirá cuando exista una fuga de gas o vapor inflamable que no se incendia inmediatamente, dando origen a la formación de una nube. Entre otros factores, la posibilidad de ocurrencia de un CVE depende de la concentración de un producto inflamable en la nube, la energía de la fuente de ignición y el nivel de confinamiento, siendo su mayor efecto la formación de ondas de sobrepresión.”

Por su parte, Motwali (2010), señala que es el resultado de la ignición de una nube inflamable de vapor o de gas, en que las velocidades de la llama son bastante altas para producir una sobrepresión significativa. Si el vapor

involucrado es inflamable, es probable que la nube resultante de gas inflamable liberado a la atmósfera prenda inmediatamente después que haya ocurrido el *BLEVE*, formando una bola de fuego.

- **Estallido de recipientes a presión.**

El origen de este tipo de explosiones puede ser muy diverso. En primer lugar, se puede producir simplemente porque tenga algún defecto de construcción el recipiente o bien porque haya una pérdida de resistencia a causa de la corrosión; estos casos son muy poco frecuentes pero pueden ser particularmente peligrosos si el contenido del recipiente es inflamable.

Otro caso sería cuando el recipiente se calienta desde el exterior (a causa de un incendio o por cualquier otra razón), de manera que la presión en el interior va aumentando mientras el recipiente va perdiendo también resistencia por el aumento de temperatura, hasta que se produce la rotura (Casal *et al.*, 2002).

- **Las explosiones de atmósferas de polvo.**

Para Casal *et al.* (2002) cualquier producto sólido que sea combustible en aire puede experimentar este tipo de explosión, siempre y cuando se encuentre dividido en partículas lo suficientemente pequeñas y esté en suspensión en una cantidad de aire lo bastante grande, como para que cada partícula tenga espacio suficiente para arder libremente. Cuanto más pequeñas sean, más fácil será su ignición y más violenta la explosión.

Normalmente las explosiones de nubes de polvo grandes comienzan por pequeñas explosiones en el interior de los equipos de proceso; cuando éstos estallan, provocan turbulencia y mezcla de más polvo con el aire, originando otra explosión de dimensiones mucho mayores y con efectos altamente destructivos. (Casal *et al.*, 2002).

- **BLEVE.**

Fenómeno de estallido normalmente asociado a la situación accidental descrita antes con el apelativo añadido de bola de fuego. Puede suceder también con sustancias licuadas a presión y no inflamables cuando, en determinadas situaciones de presión y temperatura, el recipiente que las contiene se rompe repentinamente. (Casal *et al.*, 1999). Es un suceso que ocurre con cierta

periodicidad: las sustancias que lo pueden producir (butano, propano, cloruro de vinilo, cloro, etc.) son relativamente comunes en la industria, y abundan las instalaciones susceptibles de sufrirlo (depósitos, cisternas).

Las explosiones de tipo *BLEVE* son uno de los peores accidentes que pueden ocurrir en la industria química o en el transporte de mercancías peligrosas. Desde un punto de vista riguroso estas explosiones no siempre tienen efectos térmicos. (Casal *et al.*, 2002; Blengini *et al.*, 2017)

Normalmente este accidente se origina por un incendio externo que incide sobre la superficie de un recipiente a presión, especialmente por encima del nivel del líquido, debilitando su resistencia y acabando en una rotura repentina del mismo, dando lugar a un escape súbito del contenido, que cambia masivamente al estado de vapor, el cual, si es inflamable, da lugar a una bola de fuego. Además para que se produzca una explosión de este tipo no es necesaria la existencia de reacciones químicas ni fenómenos de combustión. Podría producirse incluso en calentadores de agua y calderas de vapor. (Rosero, 2015).

Antes de terminar con este análisis no se puede dejar de decir que la naturaleza y alcance, tanto de los incendios como de las explosiones, varía en dependencia de la forma en que se produzcan, las condiciones en las que están presentes, las características del material involucrado, su cantidad y el grado de restricción de la nube de vapor. Estos son los accidentes que ocurren con mayor frecuencia en la industria química causando gran impacto económico, ambiental y humano, por lo que se hace necesario y significativo su estudio y análisis.

1.3 Herramientas para cuantificar los daños ambientales y humanos que ocasionan los accidentes de incendios y explosiones

Es sabido que los incendios y las explosiones causan elevadas pérdidas en lo referente a vidas humanas, además de afectar gravemente al medio ambiente. Hoy en día muchas personas están ajenas a los métodos existentes para determinar el riesgo de estas afectaciones. En este epígrafe se estudian las herramientas, encontradas en la literatura especializada, para cuantificar los daños que ocasionan los incendios y explosiones.

1.3.1 Herramientas para cuantificar los daños ambientales que ocasionan los incendios y las explosiones.

Una técnica muy difundida para el análisis de riesgos es la que se efectúa mediante índices. Su principal característica es que permite obtener resultados semicuantitativos con mucha rapidez y con un conocimiento muy reducido de la instalación objeto de estudio, por lo que los recursos humanos, materiales y temporales necesarios para su aplicación son escasos (Casal, 1999).

Para Carol (2001), un índice es un valor numérico que pretende medir una característica determinada del objeto de un estudio, comparándolo con otros de referencia. Un índice de riesgo tecnológico, por tanto, intenta evaluar el riesgo inherente de una instalación o proceso industrial, por comparación con otro considerado estándar, mediante el uso de unas listas de comprobación cuantificada y más o menos detallada según el índice utilizado. Aunque los índices de riesgo no son una herramienta para la identificación de peligros, se aplican mediante la utilización de listas de comprobación y éstas permiten identificar los factores de riesgo presentes en la instalación.

Entre los índices que se utilizan se pueden mencionar:

- **Índice de peligro atmosférico (AHI):**

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

- **Índice de Sustitución**

Método que se basa en la toxicología de las sustancias a sustituir en función de cambiar sustancias dañinas al medio ambiente por otras menos dañinas, en función de su costo. El mismo fue propuesto por Blengini *et al.* (2017).

- **Índice *Indiana Relative Chemical Hazard Score (IRCHS)***

Cuantifica la sostenibilidad por un índice ambiental, índice de seguridad y el incremento de la ganancia para el proceso por el valor añadido. De acuerdo al *IRCHS*, el método de la Universidad de *Tennessee* (UTN) evalúa cada químico de forma separada y asigna un valor de peligro basado sobre los peligros químicos con respecto al ambiente, con énfasis sobre el sistema acuífero.

- **Índice de Severidad de Biodiversidad (BSI)**

Este es desarrollado para escenarios de contaminación accidental, el mismo es la respuesta a la siguiente interrogante: “Si el escenario S ocurriera en las condiciones corrientes con respecto a la funcionalidad de la planta industrial estudiada y sus alrededores, cuán importante sería para la sociedad, sus esperadas consecuencias sobre el ambiente circundante”. (Denat, 2017).

- **Índice de evaluación del riesgo ambiental**

Propuesto por Chen *et al.* (2013) consiste en tres etapas: caracterizar el nivel de riesgo, desarrollar un algoritmo de evaluación para cuantificar el riesgo ambiental, y evaluar el riesgo ambiental con los datos recogidos. Se desarrolla para la evaluación del riesgo ambiental en la industria petroquímica basado en los siguientes cinco indicadores mayores: materiales peligrosos, condición de equipamiento incluyendo bombas, tuberías y tanques de almacenamiento, proceso productivo, seguridad ambiental y salud y vulnerabilidad de receptores.

- **Modelo de Evaluación del Impacto Ambiental (EIA)**

Se crea como un proceso de análisis encaminado a identificar, predecir, interpretar, valorar, prevenir o corregir y comunicar, el efecto de un Proyecto sobre el Medio Ambiente. Con el objetivo de llegar a establecer, en primer lugar, y a través de los factores ambientales considerados, los indicadores capaces de medirlos, la unidad de medida y la magnitud de los mismos, transformando estos valores en magnitudes representativas, no de su alteración, sino de su impacto neto sobre el Medio Ambiente (Conesa, 2000).

Los efectos sobre el medio vienen medidos en unidades heterogéneas, y, por tanto, sin posibilidad de comparación entre las de los distintos factores, ni de adición o sustracción de manera directa (magnitudes inconmensurables). No se

pueden cuantificar resultados globales, tales como el impacto total sobre un componente ambiental, sobre un subsistema, o el impacto total que, sobre el medio ambiente, ejerce la actividad en su conjunto. Por lo mismo, surge la necesidad de homogenizar las diferentes unidades de medida y, en último caso, expresarlas todas ellas en unidades abstractas de valor ambiental (Conesa, 2000).

El proceso consiste en referir todas las magnitudes de los efectos a una unidad de medida común a la que denominamos unidad de impacto ambiental. Esta transformación es compleja y requiere un desarrollo, en la investigación de efectos, muy importante, y acabaría en la definición de una función distinta para cada indicador de impactos que permitiera obtener el índice de calidad ambiental de un factor en función de la magnitud del impacto recibido (Conesa, 2000).

Uno de los gases más tóxicos que afectan a la atmósfera es el monóxido de carbono, el cual, durante un incendio, aumenta considerablemente su concentración en la atmósfera, por lo que es una de las sustancias que se toman como guía para cuantificar el valor de la calidad ambiental, ya que existe una función de transformación para su concentración en calidad ambiental. (Conesa, 2000). Por otra parte el humo reduce considerablemente la visibilidad, en función de la densidad óptica del combustible. (Hadjisophocleous y Benichou, 2016)

El autor de este trabajo considera, en cuanto a la evaluación del impacto ambiental, que la última metodología citada, o sea, la ofrecida por Conesa (2000) es la más idónea, ya que permite, a través de funciones, emitir un criterio de calidad ambiental en función de la magnitud de un impacto determinado, el cual se define como la concentración de monóxido de carbono que se produce durante un incendio. Al mismo tiempo, se evaluará el impacto ambiental, en cuanto a la producción de humo de un incendio, y las emisiones de dióxido de carbono, dióxido de nitrógeno e hidrocarburos.

1.3.2 Herramientas para cuantificar el impacto humano de los incendios y las explosiones.

Al igual que el impacto al medio ambiente de los incendios y explosiones, es objetivo en este trabajo conocer el impacto humano de los mismos, por lo que este epígrafe se dedica al estudio de algunas herramientas existentes para cuantificar el daño humano causado por estos accidentes.

- **Índice de simple K**

Permite cuantificar el riesgo a la vida humana, fue propuesto por Aboud (2008), partiendo de la definición básica de riesgo, el cual se considera el producto de la probabilidad del incidente con la magnitud de sus efectos peligrosos. Este índice se puede aplicar a plantas químicas, empleando las propiedades de los químicos asociados a la producción.

El índice se determina por la ecuación:

$$K = Freq * Haz * Inv * Size \quad (1.1)$$

Dónde:

Freq: es la frecuencia de los accidentes, específicamente el número de accidentes por procesos por año;

Haz: es el efecto peligroso de un químico, el número de personas afectadas por tonelada de químico liberado;

Inv: es el inventario de los químicos liberados en toneladas por accidentes;

Size: es el tamaño de la planta, el número de los procesos mayores en la planta.

Este índice da una unidad global de K como número de personas afectadas por año, y representa el número máximo potencial de personas afectadas, en el caso de que un accidente cause el escape de todo el inventario de la planta de un químico determinado. Las personas afectadas incluyen fatalidades, personas afectadas y hospitalizadas. Se asume que la planta presenta un proceso mayor, en el cual un químico mayor se trata y un accidente en una parte de la planta puede causar, en un caso extremo, el escape del inventario de la planta.

Benichou (2016), propone los detalles para el cálculo de este índice:

Los peligros del químico (Haz) se calculan a partir de bases de datos de accidentes, mirando el número de todos los accidentes asociados con el químico y dividiendo el número de personas afectadas por la cantidad escapada.

El inventario (Inv) se toma como la producción máxima inventariada en una planta petroquímica, usualmente en un mes de producción.

El tamaño de la planta (Size), en términos de procesos mayores, puede variar de una planta a otra, pero se toma como 3 este número generalmente.

De los valores usados para los parámetros el índice depende la evaluación más realista del índice de riesgo. Este puede ser aplicado a una planta química incluyendo químicos mayores o menores, se usa el inventario de un mes de producción para calcular un máximo teórico para el riesgo y el número usado para el tamaño es un número representativo, una media.

El mismo puede aplicarse para químicos en una planta, la cual no sea de almacenamiento y se puede emplear para estimar el riesgo desde un proceso simple, incluye la experiencia de previos accidentes en base de datos, las cuales se consideran fuente de valores de la información.

- **Índice de Severidad de Biodiversidad (BSI)**

Fue descrito en el epígrafe anterior, también evalúa impacto humano, en cuanto a toxicidad. (Denat, 2017).

- **Análisis *Probit***

Es el método más usado, que requiere de una función que relacione la magnitud del impacto (la radiación térmica procedente de un incendio), con el grado de daño causado; establece una relación entre la dosis y la respuesta. Este análisis relaciona la variable *Probit* (de *probability unit*) con la probabilidad. (Casal *et al.*, 2002; Domínguez, 2014; López, 2017; Sanmiquel *et al.*, 2018; Wells, 2003).

La probabilidad (P) de muerte de una persona promedio sin protección, que está constantemente expuesta a un peligro en un lugar determinado, es el

riesgo individual anual de muertes o lesiones graves a las que se encuentran expuestos varios individuos específicos. (Jongejan *et al.*, 2010).

La *probit* (Y) es una medida del porcentaje de la población vulnerable sometida a un fenómeno perjudicial de una determinada intensidad (V), que recibe un daño determinado. Tiene una distribución normal, con una media de 5 y una desviación normal de 1.

La relación entre ambas variables es la descrita en la ecuación:

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

Esta relación tiene la ventaja de transformar la función sigmoïdal que corresponde a la relación dosis-respuesta en una línea recta, lo que facilita considerablemente el ajuste de las constantes.

Según Domínguez (2014) la fórmula empleada para este modelo de vulnerabilidad se basa en una función matemática lineal de carácter empírico extraída de estudios experimentales. El valor *probit* permite determinar el porcentaje de la población expuesta que se verá afectada a un determinado nivel de lesiones o por muerte, estos valores se encuentran tabulados para establecer la relación entre los mismos.

Normalmente la probabilidad (que varía de 0 a 1) se sustituye por un porcentaje (de 0 a 100), lo cual es más práctico en el análisis de riesgo. Para su aplicación se suele utilizar la ecuación:

$$Y = a + b \ln V \quad (1.3)$$

Donde a y b son constantes que se determinan experimentalmente a partir de la información procedente de accidentes o, en algunos casos, de experimentación con animales. La variable V, es una medida de la intensidad de lo que causa el daño, puede tratarse de un solo parámetro (por ejemplo, una sobrepresión) o puede estar formada por una función de diversas variables (por ejemplo, una combinación de concentración y tiempo). La aplicación de este porcentaje sobre la población afectada por el accidente permitirá estimar el número de víctimas. (Casal *et al.*, 2002).

Las consecuencias de la radiación térmica sobre la piel son las quemaduras, cuya gravedad depende de la intensidad de la radiación y de la dosis recibida. Según sea su profundidad las quemaduras se clasifican en tres categorías: quemaduras de primer, segundo y tercer grado.

La existencia de quemaduras en una superficie importante del cuerpo, con la consiguiente destrucción o degradación de la piel, provoca la pérdida de fluido y aumenta extraordinariamente la probabilidad de infecciones. La esperanza de vida de un quemado está estrechamente condicionada por la superficie del cuerpo afectada por quemaduras de segundo y tercer grado. En el caso de quemaduras con una extensión de aproximadamente un 30 % o más de la superficie corporal, puede producirse un choque.

El denominado límite soportable para las personas se considera del orden de 5 kW/m². Como valor de referencia se toma el valor de la intensidad de la radiación solar en un día soleado, que es de aproximadamente 1 kW/m² (a nivel del mar).

Una persona siente dolor cuando la piel llega a una temperatura de 45 °C a 0,1 mm de profundidad; estos datos permiten obtener la ecuación:

$$t_d = \left(\frac{35}{q}\right)^{1.33} \quad (1.4)$$

Dónde: t_d es el tiempo necesario para sentir dolor en s;

q es el flujo térmico incidente, kW/m².

A 5 kW/m² el tiempo necesario para sentir dolor en la piel desnuda es de 13 segundos aproximadamente, y con 40 s pueden producirse quemaduras de segundo grado. En general se considera que no hay dolor, sea cual sea el tiempo de exposición, con flujos térmicos inferiores a 1,7 kW/m². Cuando la temperatura de la piel llega hasta 55 °C aparecen las ampollas.

Si la persona está vestida, la situación es distinta. La ropa protege de la radiación siempre que no se queme; en caso de quemarse, su combustión provocará quemaduras graves, con una elevada probabilidad de muerte. Si la ropa no se quema, su presencia reduce la superficie del cuerpo expuesta.

A la hora de analizar la mortalidad, teniendo en cuenta la protección de la ropa, puede estimarse utilizando la ecuación anterior y tomado un 14 % del resultado obtenido.

Con respecto a las explosiones, el cuerpo humano es muy resistente a una sobrepresión, ya que está formado en gran parte por agua, un fluido no compresible. Así, los daños directos tienen lugar esencialmente en aquellos partes del cuerpo susceptibles de ser aplastadas, o sea, en los espacios vacíos (caja pulmonar y conducto auditivo), especialmente cuando el aumento de presión es súbito y no hay tiempo suficiente para adaptarse.

Las peores situaciones son aquellas en las que el cuerpo se encuentra cerca de una superficie (resistente) plana, perpendicular a la dirección de propagación de la onda de sobrepresión, que la refleja. Las sobrepresiones más altas aparecen cuando el cuerpo humano tiene su eje longitudinal perpendicular a la dirección de propagación de la sobrepresión. Esta es la posición más probable y, por lo tanto, la que se debe tener en consideración en el cálculo de los efectos directos.

Finalmente, el impacto es menor cuando el eje longitudinal del cuerpo está en la misma dirección que la propagación de la onda de choque.

La mortalidad por hemorragia pulmonar provocada por el aplastamiento de la caja torácica puede estimarse utilizando el impulso y las curvas de supervivencia. Otro efecto directo es la rotura del tímpano.

En cuanto a lo analizado, se escogen las ecuaciones *Probit* Y para cuantificar el impacto humano. Innumerables son las ecuaciones existentes mediante las cuales se pueden calcular los daños a los recursos humanos por radiación y sobrepresión, entre las mismas se encuentran las propuestas por Casal *et al.*, (2002), Lees (2012) y Wells (2003). Pero para la realización de este trabajo se escogen las ecuaciones propuestas por Lees (2012) para calcular los daños por sobrepresión y quemaduras por radiación; y las de Wells (2003) para porcentaje de muertes por hemorragia pulmonar debido a sobrepresión.

1.4 Software ALOHA

Son muchos los *softwares* existentes que permiten simular los diferentes escenarios de los accidentes químicos, que podrían ocurrir en una industria, proporcionando así una mejor preparación y entrenamiento ante situaciones de emergencia.

De todos, es considerado como el más idóneo, el *software ALOHA*; el cual ha sido desarrollado conjuntamente por las agencias norteamericanas NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) y EPA (*Environmental Protection Agency*).

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.

Es capaz de estimar cómo una nube de gas peligrosa podría dispersarse en la atmósfera después de una descarga química accidental, 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 que realiza representan un compromiso entre exactitud y velocidad: se ha diseñado para que produzca buenos resultados con la suficiente rapidez. Además revisa la información que se le introduce y avisa cuando se comete un error.

1.5 Conclusiones Parciales

- 1 El gas licuado del petróleo es un combustible amigable con el medio ambiente y tiene propiedades que facilitan su comercialización a gran escala.
- 2 Podría considerarse que los incendios constituyen un menor peligro potencial que las explosiones y los escapes de sustancias tóxicas.
- 3 La explosión de una nube de vapor inflamable no confinada (*UVCE*) representan uno de los mayores peligros dentro de la industria química,

pues ocurren con mucha mayor frecuencia que los escapes tóxicos, que pueden, potencialmente, producir más víctimas.

- 4 La metodología de Conesa (2000) es la idónea para cuantificar el impacto ambiental ya que ofrece criterio de calidad circunstancial en función de la concentración de contaminantes.
- 5 Las ecuaciones *Probit* son herramientas sencillas y apropiadas para cuantificar el daño sobre las personas por radiación y sobrepresión.
- 6 El *software ALOHA* es una herramienta fiable para simular los distintos escenarios de riesgos que pueden existir en la industria química.

Capítulo 2: Materiales y Métodos.

Roldan K. y Dueñas J., (2020), afirman que para definir los escenarios que se pueden manifestar ante la ocurrencia de un derrame de sustancias químicas, hay que tener en cuenta en primer lugar las propiedades de las mismas, así como las propias características de la instalación.

En este capítulo se realiza 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 se describen tanto las características toxicológicas del gas licuado del petróleo, como la metodología, a seguir para determinar el impacto ambiental y humano provocado por posibles escenarios de riesgos de incendios y explosiones.

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 existiendo 21 balas de gas licuado dispuestas en 4 cubetos.

Esta planta posee 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; además cuenta con una estación de dos compresores, los cuales son de utilidad a la hora de compensar las presiones para la recepción del producto y trasiego entre balas. La misma tiene como objetivo principal la recepción y distribución de dicho producto, el 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, conjuntamente se llenan balones de 25 y 100 libras para la distribución al resto de la población.

Tabla 2.1: Descripción de los principales equipos.

Balas de almacenamiento de GLP						
Balas	Cubeto	Capacidad del cubeto	Capacidad	Longitud	Diámetro	Espesor
01 a 08	1	510 m ³	112m ³	20 m	2.614 m	21 mm
09 a 018	2 y 3	850 m ³	200 m ³	21 m	3.40 m	26 mm
019 a 021	4	761.6 m ³	200 m ³	21 m	3.40 m	26 mm
Bombas centrífugas multietapas						
Bombas	Capacidad	Velocidad	Presión de succión	Potencia	CDT	NPSH
01 a 02	12 m ³ /h	1450 rpm	19 barg	3 kW	98 m	>0.45 m
03 a 05	20 m ³ /h	1700 rpm	19 barg	5.5 kW	129 m	
Compresores						
Compresor	Capacidad	Presión		Velocidad	Potencia	
		Succión	Descarga			
01 y 02	20 y 75 m ³ /h	7 kg/cm ²	15 kg/cm ²	350 rpm	14.7 HP	

Fuente: Elaboración propia.

2.1.1 Descripción del proceso.

- **Descarga de buques y tanques cisternas**

La recepción del producto desde los barcos en el Muelle se realizará mediante mangueras y a través de líneas. Estas líneas están interconectadas a todas las áreas de almacenamiento de GLP que existen en la Planta.

Generalmente el tiempo de recepción de los barcos y camiones cisternas oscila entre 43 y 71 horas por lo que considerando que en ese intervalo se llene el volumen de almacenamiento de GLP los flujos de recepción promedio oscilan entre 12 y 20 m³/h.

Considerando que el barco será descargado en la Comercializadora encontrándose vacía las balas del cubeto 2 y las balas del cubeto 1 y se realizará la operación de descarga en serie, para las mismas los tiempos de llenado serán:

Las balas de la 08 a la 012, correspondientes al cubeto 2 con capacidad total de 850 m³ se llenarán en 71 horas para un flujo de 12 m³/h y 43 horas para un flujo de recepción de 20 m³/h. Las balas del cubeto 1 con capacidad de 510 m³ se llenarán en 43 horas, para un flujo de 12 m³/h y 26 horas para un flujo de recepción de 20 m³/h. Al sumar los tiempos y los volúmenes descargados se obtiene que demoraría 117 horas descargar 1360 m³ a un flujo de 12 m³/h y 69 h a un flujo de 20 m³/h.

Es necesario aclarar que los flujos de recepción son tentativos y pueden ser menores, dependiendo de la caída de presión que introduzcan en el sistema las válvulas auto-reguladas.

Al producto recepcionado se le adicionará Etil-mercaptano, desde un pequeño recipiente de acero al carbono, del cual sale una línea y se interconectará a la línea de GLP líquido que entra a la base. Esta operación se realizará manualmente, adicionando el volumen de Etil-mercaptano requerido de acuerdo al flujo de GLP recepcionado.

- **Trasiego:**

Se podrá trasegar el producto utilizando tres de las bombas disponibles, las cuales operarán dos en paralelo y una de reserva para lograr el caudal requerido.

La operación de trasiego se realizará con una línea de compensación de dos compresores, los cuales son de utilidad a la hora de compensar las presiones para el trasiego entre balas.

- **Entrega de GLP desde las balas hacia buques o camiones cisternas.**

Desde todas las balas de almacenamiento, será succionado el GLP por tres de las bombas que se encuentran en la estación de bombas. Se operará con dos bombas en paralelo y una de reserva, para lograr el caudal necesario con el cual se logra entregar todo el volumen almacenado en las balas hacia el Buque Tanque o camión cisterna. La descarga de las bombas será la una línea que se interconectará a la línea del vehículo disponible o al muelle en que se encuentre el barco.

Es necesario destacar que durante el bombeo debe prestarse atención especial a las presiones de succión de la bomba para evitar la cavitación de las mismas.

En el anexo 2 se puede ver un esquema que refleja la manera en que están instaladas las balas de GLP.

2.2 Procedimiento de identificación de la sustancia involucrada en el proceso.

El peligro potencial de una instalación industrial depende en gran medida de las características de las sustancias involucradas en el proceso. Los datos de interés para los análisis posteriores son básicamente las propiedades de las sustancias y sus condiciones en el proceso.

Según **Orozco, (2007)**, la caracterización de las sustancias involucradas en un proceso se desarrolla mediante la siguiente guía:

Identificación del producto.

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

Datos Físicos.

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

- Capacidad calorífica.

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.

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: Modelo para la clasificación toxicológica de la sustancia analizada.

Sustancia	Toxicidad							
	Tox. aguda	Irritación	Sensibilización	T. por dosis repetida	Mutagenicidad	Carcinogenicidad	Corrosión	T. para la reproducción

Condiciones de almacenamiento y manipulación.

- Nombre del producto almacenado.
- Forma del recipiente (cilíndrico, rectangular, vertical, horizontal, etc.).
- Dimensiones del recipiente (largo, ancho, diámetro).
- Material de construcción.
- Protección del recipiente (interior o exterior).
- Existencia de accesorios en el recipiente y su localización.
- Fecha de fabricación del recipiente.
- Condiciones de almacenamiento de las 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).
- Fallos ocurridos en estos equipos al operar con estas sustancias.
- Material de construcción de los equipos donde es usada.
- Protección del sistema de tuberías.

2.2.1 Consideraciones relacionadas con el escenario de incendio y el estado de agregación de la sustancia.

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 2.3 un resumen de las características citadas.

Tabla 2.3: 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

Los resultados anteriores, deben ser considerados para definir los escenarios más probables que se deben originar ante un escape de GLP.

2.3 Metodología general de investigación.

En este trabajo se aplica la metodología de investigación propuesta y desarrollada por, Roldan K. (2019), en sus investigaciones para analizar los diferentes riesgos que se pueden poner de manifiesto en una instalación por concepto de incendios y explosiones.

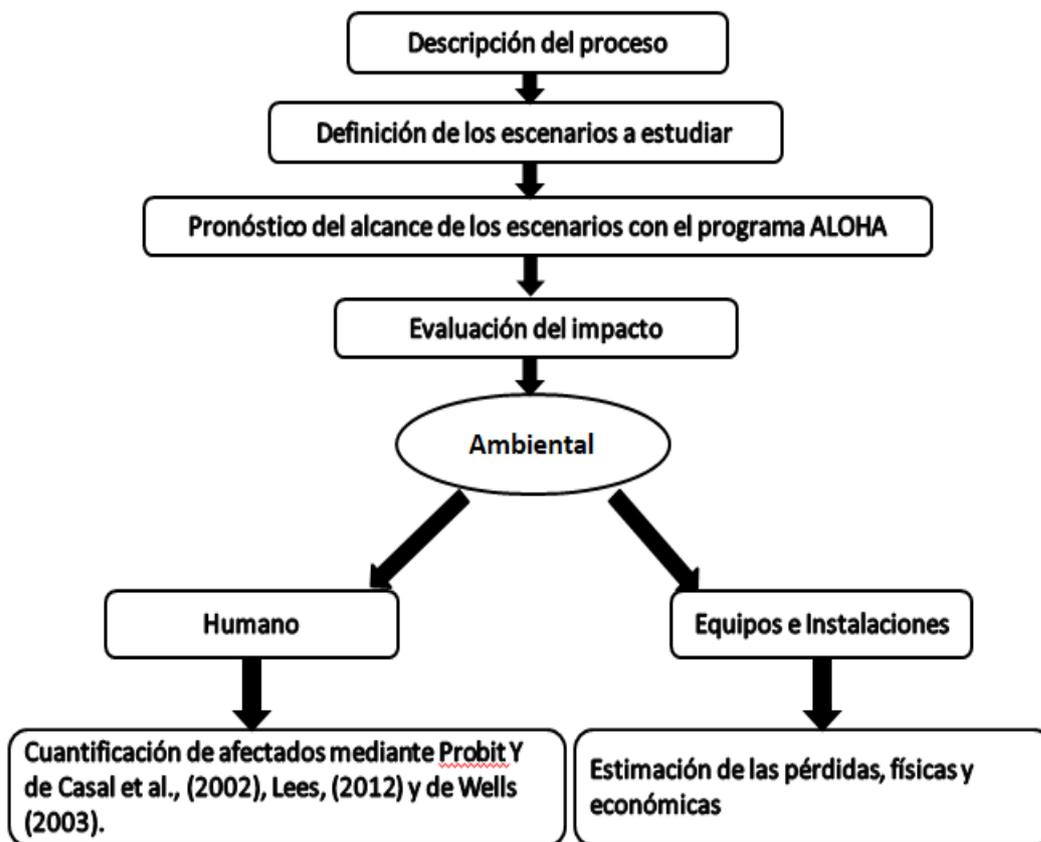


Figura 2.1: Metodología general basada en la secuencia lógica de análisis de Roldan K, (2019).

Fuente: Elaboración propia.

2.4 Características y particularidades del software ALOHA

El software ALOHA de la EPA de EEUU es reconocido, por el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba (CITMA), como un buen simulador que permite cuantificar los riesgos a través de la modelación de los mismos y determinar para aquellos riesgos posibles de cuantificar las áreas de atmósferas peligrosas. Para la realización de este análisis se utiliza la versión 5.4.7 del 2016 que aporta resultados confiables

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

La dispersión de los químicos en el aire es un término usado por los especialistas que incluye la advección y la difusión. Una nube de gas dispersándose se moverá por advección en la dirección del viento y por difusión en flujo cruzado en la dirección vertical del viento. Utiliza dos modelos:

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

Algunos de los términos usados son:

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

ALOHA define las propiedades que condicionan un fuego de acuerdo a lo planteado por Botta, (2012) y Martínez, (2014) como:

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

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

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

- Se utilizan tres valores de *LOC*, medidos en kW/m^2 :
 - ✓ Rojo: 10 kW/m^2 . Potencialmente letal en el intervalo de 60 sec.
 - ✓ Naranja: 5 kW/m^2 . Quemaduras de segundo grado en el intervalo de 60 sec.
 - ✓ Amarillo: 2 kW/m^2 . Dolor en 60 sec.

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

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

- Amarillo: 1 psi (destrucción de cristales)

ALOHA no modela los fragmentos peligrosos de una explosión.

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

- Dardos de fuego
- Piscinas de fuego
- BLEVE
- Áreas inflamables
- Explosión de una nube de vapor

La explicación de estos escenarios puede verse en el manual de usuario *ALOHA*, (2016).

Otras particularidades del *software* son:

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

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

Además, el modelo no incorpora efectos de:

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

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

versiones anteriores algunas soluciones, tales como ácidos anhídridos en agua y ácidos fluorhídricos en agua.

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

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

En el caso que se suministre que ocurre la inversión hay que dar la altura a la cual ocurre este proceso.

Para entregar los datos de humedad del aire se podrá indicar el valor particular o dar los casos extremos, húmedo, medio o seco.

Los resultados que se obtienen del software, además de los gráficos pueden ser encontrados en un texto sumario.

- Datos del sitio.
- Datos del químico.
- Datos atmosféricos.
- Fuente Directa.
- Zona Tratada.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

En la siguiente tabla se resumen las diferentes fuentes y escenarios de trabajo del *ALOHA*.

Tabla 2.3: Escenarios de trabajo del software ALOHA.

Fuente	Escenarios tóxicos	Escenarios de incendio	Escenarios explosivos
Directa			
Escape directo	Nube tóxica	Llamarada de fuego	Nube explosiva
Charco			
Evaporación	Nube tóxica	Llamarada de fuego	Nube explosiva
Inflamable		Piscina de fuego	
Tanque			
No inflamable	Nube tóxica	Llamarada de fuego	Nube explosiva
Inflamable		Dardo de fuego o Piscina de fuego	
<i>BLEVE</i>		BLEVE (Bola de fuego y piscina de fuego)	
Tubería de gas			
No inflamable	Nube tóxica	Llamarada de fuego	Nube explosiva
Inflamable		Dardo de fuego	

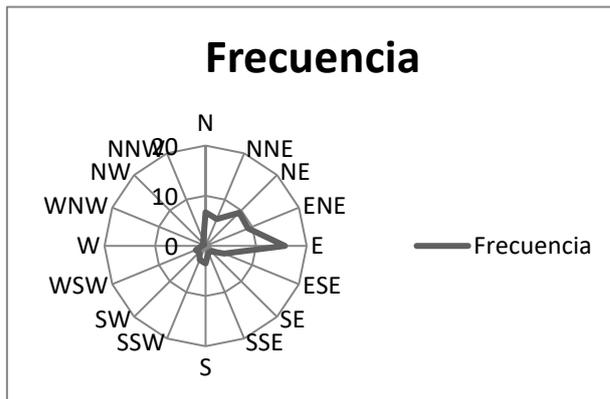
Fuente: Elaboración propia.

Díaz A. (2013) demuestra en sus investigaciones que existen escenarios, cuyas características no dependen de las variables climatológicas o sus variaciones son despreciables por lo que es posible evaluar los mismos atendiendo únicamente al dispositivo de almacenamiento y sus condiciones de operación, como son el *jet Fire* y el *BLEVE*.

Para el caso de la nube de vapor explosiva y/o tóxica se evalúan atendiendo a las direcciones del viento más frecuentes en la zona objeto de estudio, con sus respectivas velocidades, el resto de las variables climatológicas se toman según indica Moya, (2010); López, (2010); Nguyen, (2011).

A continuación se refleja el resultado de la frecuencia de la dirección del viento:

Figura 2.1: Frecuencia de la dirección del viento en la zona de estudio (10 años).



Siendo estas la dirección más frecuentes y atendiendo a las dirección más peligrosas para la planta se decide evaluar ALOHA en dirección Este, Oeste-Sudoeste y en estado de Calma.

2.5 Método “*Probit*”.

En este método se parte de una manifestación física de un incidente y brinda como resultado, una previsión de los daños a las personas expuestas al incidente, es decir: número de heridos por diferentes lesiones y número de víctimas fatales. Medina (2003) y Domínguez (2014) apuntan que es un método estadístico que nos da una relación entre la función de probabilidad y una determinada carga de exposición a un riesgo, es un método muy destacado entre los modelos de vulnerabilidad, los cuales son basados en experiencias realizadas con animales de laboratorio o estudios de muertes y lesiones de accidentes ocurridos.

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

$$Pr = a + b \cdot \ln V \quad 2.1$$

Donde:

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

a: Constante dependiente del tipo de lesión y tipo de carga de exposición.

b: Constante dependiente del tipo de carga de exposición.

V: Variable que representa la carga de exposición.

Una vez determinado el valor *Probit*, se busca el porcentaje de personas implicadas en la tabla que se ofrece en el anexo 3.

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

- **Vulnerabilidad a radiaciones térmicas.**

Se emplea para determinar el porcentaje de personas afectadas por los efectos de las radiaciones térmicas en función de la intensidad de irradiación recibida y del tiempo de exposición o dosis de radiación calorífica recibida. Para el caso de estudio, se establecen 60 segundos como tiempo de exposición, para actuar en concordancia con ALOHA.

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

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

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

- **Quemaduras mortales:**

- con ropa de protección: $Pr = -37,23 + 2,56 \cdot \ln(t \cdot I^{4/3})$ 2.2
- sin protección: $Pr = -36,38 + 2,56 \cdot \ln(t \cdot I^{4/3})$ 2.3
- Quemaduras de segundo grado: $Pr = -43,14 + 3,0188 \cdot \ln(t \cdot I^{4/3})$ 2.4
- Quemaduras de primer grado: $Pr = -39,83 + 3,0186 \cdot \ln(t \cdot I^{4/3})$ 2.5

Donde:

t =Tiempo efectivo de exposición (s).

I = Intensidad de irradiación (W/m²).

- **Vulnerabilidad a explosiones.**

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

Al considerar las consecuencias de las explosiones sobre las personas, se debe hacer distinción entre consecuencias directas e indirectas. 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, según Domínguez (2014), son las siguientes:

- **Muerte por lesiones pulmonares:**

$$Pr = -77,1 + 6,91 \ln(P) \quad 2.6$$

- **Porcentaje de afectados por rotura de tímpano:**

$$Pr = -15,6 + 1,93 \cdot \ln(P) \quad 2.7$$

Donde P es la sobrepresión máxima expresada en N/m².

- **Porcentaje de muertes por desplazamiento y colisión del cuerpo contra obstáculos:**

$$Pr = -46,1 + 4,82 \cdot \ln(J) \quad 2.8$$

- **Porcentaje de lesionados por desplazamiento y colisión del cuerpo contra obstáculos.**

$$Pr = -39,1 + 4,45 \cdot \ln(J) \quad 2.9$$

Donde J es el impulso originado por la sobrepresión durante el tiempo de actuación, en N s/m².

Valores de referencia de consecuencias sobre edificios según la sobrepresión alcanzada:

- Daños importantes en edificios (casi completa destrucción): 0,35 bar.
- Daños reparables en edificios: 0,10 bar.

- Rotura de cristales en edificios: 0,05 bar.

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

2.6 Estimación de las pérdidas de recursos físicos y económicos por concepto de incendio y explosión.

La cuantificación de las pérdidas físicas se hacen atendiendo al criterio de Wells (2003), y las pérdidas económicas, se estiman usando el software CAPCOST.

Capítulo 3: Análisis de los resultados.

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos del programa *ALOHA*, referidos a los posibles escenarios de incendio y explosión ante un escape de GLP, se exponen y comentan los resultados relacionados por el impacto provocado al medio ambiente y a los recursos humanos.

3.1 Análisis para la selección de los escenarios de esta investigación.

De acuerdo al vínculo entre el escenario de incendio y el estado de agregación de la sustancia, realizado en el capítulo anterior, y a los resultados de las investigaciones realizadas por Díaz A., Díaz S. (2013), y Guillen E. (2020), a partir de los registros históricos de accidentes con GLP, el escenario que con mayor frecuencia 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.

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
<i>BLEVE</i>	0,013849	72,21
VCE	0,291932	3,42
Nube Tóxica	0,020502	48,78

En correspondencia con lo explicado anteriormente los escenarios que serán analizados son:

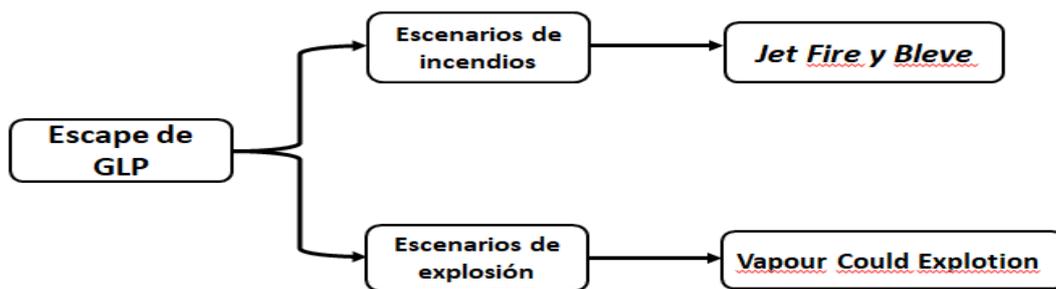


Figura 3.1: Posibles escenarios que serán analizados.

Fuente: Elaboración propia.

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

En esta investigación, 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). En el anexo 4 se ofrecen estas variables climatológicas.

1. Evaluar solo los escenarios que se seleccionan en el epígrafe anterior.
2. Se evalúan las direcciones del viento, más representativas, donde se encuentran las áreas con mayor concentración de trabajadores dentro de la UEB. En el primer cuadrante de la rosa de los vientos: este (E); en el tercero: oeste-sudoeste (WSW), además del 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. 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). y las variables climatológicas de los meses definidas por Moya (2016).

3.3 Análisis de los resultados del software ALOHA.

Los resultados obtenidos del programa ALOHA, brindan con nivel profesional la información para completar mediante otras herramientas el daño material y humano que estos escenarios de incendio y explosión, provocan en dependencia del radio de su alcance.

3.3.1 Determinación del alcance del escenario *Jet Fire* para ambos tipos de bala, 100 y 200 m³.

Para ofrecer un criterio del alcance de un escenario a diferentes recursos materiales y humanos, se necesita primero las dimensiones del escenario, estas se obtienen por el programa y se reflejan a continuación.

Tabla 3.1: Resumen de las extensiones de las áreas de peligro de un *jet fire* para las diferentes capacidades y el nivel de radiación para el radio medio de cada área. Estado de calma.

Tipo de bala	Velocidad del viento (m/s)	Radiación (kW/m ²)	Radio del área(m)	Tiempo de duración. (min)	Razón de quemado (kg/min)	Longitud máxima de la llama (m)
100 m ³	CALMA ≤ 1	LOC-3 (10.3)	80,4	10	8740	88
		LOC-2 (5.21)	128			
		LOC-1 (2,03)	213			
200 m ³	CALMA ≤ 1	LOC-3 (10.1)	82,6	14	8850	89
		LOC-2 (5.11)	130			
		LOC-1 (2.01)	215			

Fuente: Elaboración propia.

Con los resultados de la tabla 3.1 se demuestra que tanto la longitud máxima de la llama como la razón de quemado varían muy poco, lo que indica que estos parámetros no dependen de la capacidad de almacenamiento, lo mismo sucede para el tiempo de duración, el cual aumenta relativamente poco (cuatro unidades) con la capacidad de almacenamiento. Se deduce que tanto las áreas de peligro como la razón de quemado y la longitud de la llama deben depender del diámetro del orificio de abertura.

En cuanto la tabla anterior se observa que para un radio aproximado de 83 m correspondiente a la zona roja, se alcanza una radiación mayor que 10 kW / m² en 60 segundos, la cual resulta potencialmente letal.

En el área anular de la zona naranja de un ancho de 47.4 m, se alcanza una radiación mayor que 5 kW / m², originando quemaduras de 2do grado en 60 segundos; mientras que en el área más exterior, de un ancho de 85 m aproximadamente, se alcanza una radiación mayor que 2 kW / m², que puede causar irritación de la piel y dolor.

A continuación se ofrece las distancias dentro de la planta, como segundo aspecto de interés para definir el nivel de afectación en función de las dimensiones del escenario y la distribución de la planta.

Tabla 3.2 Dimensiones de la Planta de GLP.

Locales	Distancias Dentro de la planta (m)
Distancia entre Balas	3,5 – 4,6
Bala más lejana, de la puerta entrada a la planta (Origen)	62
Bala más cercana, de la puerta entrada a la Planta o Garita de entrada	42 (medida desde la bala más lejana)
Oficina de despacho	82 (medida desde la bala más lejana)
Oficina de control de técnico	78 (medida desde la bala más lejana)
Oficina general (Bala más cercana)	94 (medida desde la bala más lejana)
Área de llenado de las balas comerciales	128 (medida desde la bala más lejana)

Auxiliándonos de las tablas 3.1 y 3.2 se infiere que con la ocurrencia de *un jet fire* tanto en la bala más lejana como en la más cercana, que se encuentre en el establecimiento, todas aquellas personas, objetos o equipos que se localice alrededor de la puerta de entrada de la planta (origen), alcanzaría una radiación, correspondiente a la zona roja, mayor que 10 KW / m² en solo 60 segundo lo que sería potencialmente fatal. Lo mismo ocurriría para todo aquello que esté cerca de la Garita de entrada, la Oficina de Despacho y en la Oficina de Control.

Todo el personal de la planta que se encuentren cerca o dentro de la Oficina General, al igual que en el Área de llenado de las balas comerciales durante la ocurrencia de este escenario, estarían expuestos a una radiación mayor que 5 kW / m², ya que estarían en el área anular de la zona naranja, los mismos podrían sufrir quemaduras de 2do grado en 60 segundos.

3.3.2 Afectación de la radiación de un *Jet Fire* en la propia Planta de GLP.

Los resultados de la afectación por radiación de un dardo de fuego al personal de la planta se obtienen de la aplicación del método *Probit* y se muestran a continuación.

Tabla 3.3: Resultados de la afectación de la radiación de un *Jet Fire* en la propia Planta de GLP. Bala de 200 m³. En estado de calma.

Lugar	Radiación (kW/m ²) que alcanza al lugar	Afectaciones							
		Quemaduras mortales (con protección)		Quemaduras mortales (sin protección)		Quemaduras de segundo grado		Quemaduras de primer grado	
		Valor Pr	% afect	Valor Pr	% afect	Valor Pr	% afect	Valor Pr	% afect
Bala más lejana, de la entrada (Origen)	14	5,84	80	6,69	95,5	10,95	100	7,65	99,6
Bala más cercana, o Garita de entrada	19,4	6,95	97,5	7,8	99,8	12,26	100	8,96	100
Oficina de despacho	9,98	4,68	37,5	5,53	70,4	9,59	100	6,28	90
Oficina control	10,8	4,95	48	5,80	78,5	9,91	100	6,60	94,5
Oficina general	8,5	4,13	19,4	4,98	49,6	8,94	100	5,64	74
Área de llenado	5,03	2,34	0	3,19	3,5	6,83	96,7	3,53	7,4

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.4: Resultados de la afectación de la radiación de un *Jet Faire* en la propia Planta de GLP. Bala de 100 m³. En estado de calma.

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	% afect.	Valor Pr	% afect.	Valor Pr	% afect.	Valor Pr	% afect.
Bala más lejana, de la entrada (Origen)	13,2	5,64	74	6,49	93,2	10,72	100	7,41	99,2
Bala más cercana, o Garita de entrada	19,1	6,9	97,2	7,75	99,7	12,2	100	8,9	99,9
Oficina de despacho	9,98	4,68	37,5	5,53	70,5	9,59	100	6,28	90
Oficina control	10,8	4,95	48	5,8	78,8	9,91	100	6,6	94,6
Oficina general	8,56	4,16	20	5,01	5,28	8,97	100	5,67	75
Área de llenado	5,29	2,52	0	3,37	5,5	7,04	97,7	3,97	15,1

Fuente: Elaboración propia.

Las tablas anteriores muestran el porcentaje de afectaciones obtenidos por *Probit* del escenario *Jet Fire* con vientos en estado de calma, para las balas de 200 m³ y 100 m³ respectivamente. Las áreas generadas por el este escenario, para ambas capacidades, no difieren mucho entre ellas; las mismas afectan a todos los locales dentro de la Empresa y por ende, a gran parte del personal que en ellos se encuentre.

Considerando que la planta es abierta y que puede haber personal de la misma y ajena a ella, sin protección, en diferentes puntos de ubicación en el presunto momento del accidente, se muestra un resumen de la afectación a diferentes distancias (20 m de variación) de la fuente de emisión.

Tabla 3.5: Porcentaje de muertes probables por efecto de la radiación térmica generada por un *Jet Fire*.

Distancia (m)	Radiación (W/m ²)	Probit Y	% de Muertes
20	28000	9,05	100
40	19800	7,87	99,78
60	14500	6,81	96,8
80	10600	5,74	77
100	7780	4,68	37,5
120	5900	3,74	10,52
140	4500	2,81	1,5
160	3700	2,15	0

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla la proporcionalidad que existe entre el % de muertes y las respectivas distancias es innegable. De las personas que se encuentren entre 20 y 60 metros, prácticamente todas mueren, si tenemos en cuenta que la longitud total de la planta es aproximadamente 100 metros, puede quedar expuesto todo el personal de la planta en dependencia de la bala que este afectada.

Se infiere que a partir de los 60 metros disminuye en gran medida el por ciento de personas que perderían la vida y a distancias mayores de 100 metros el por ciento de muertes es considerablemente menor con respecto a los demás, sin dejar de destacar que a partir de los 160 m nadie correría riesgo para su vida.

En la siguiente figura se muestra el alcance de las radiaciones del *Jet Fire* para una bala de 200 m³.



Figura 3.2: Alcance de las radiaciones de un *Jet Fire* en una bala de 200 m³.

3.3.3 Determinación del alcance y afectaciones de la radiación del escenario *BLEVE* para ambos tipos de bala, 100 y 200 m³ en la propia Planta de GLP. En estado de calma.

El escenario *BLEVE* más bola de fuego se puede originar como accidente secundario a partir del escenario dardo de fuego. Se considera como el escenario de menor duración, pero enormemente desbastador por la radiación de su bola de fuego, esto sin incluir la sobrepresión que genera y que el programa *ALOHA* no mide. La siguiente figura muestra el comportamiento de la radiación de un *BLEVE* en la propia Planta de GLP. En estado de calma.

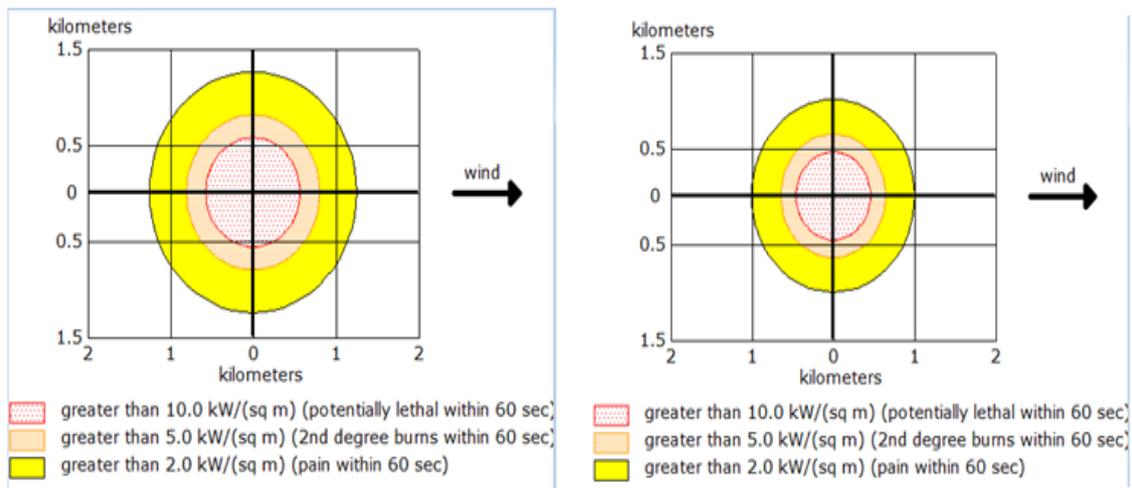


Figura 3.3: Comportamiento de la radiación de un *BLEVE* las balas de 200 m³ y 100 m³ respectivamente. En estado de calma.

Los resultados obtenidos mediante el *software ALOHA* se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3.6: Resumen de las extensiones de las áreas de peligro para las diferentes capacidades y el nivel de radiación para el radio medio de cada área. En estado de calma.

Tipo de bala	Velocidad del viento (m/s)	Radiación (kW/m ²)	Radio del área(m)	Diámetro de la bola de fuego (m)	Tiempo de duración (s)
100 m ³	CALMA ≤ 1	LOC-3 (10)	458	212	13
		LOC-2 (5)	646		
		LOC-1 (2)	1000		
200 m ³	CALMA ≤ 1	LOC-3 (10)	570	267	16
		LOC-2 (5)	805		
		LOC-1 (2)	1300		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.7: Resultados de la afectación de la radiación de un *Bleve* de una bala de 100 m³ para el estado de calma.

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.	Valor Pr	No. afect.	Valor Pr	No. afect.
Área de llenado	81.95	11,87	100	12,72	100	18,07	100	14,76	100

Fuente: Elaboración propia.

Hasta ahora este es el escenario de mayor alcance estudiado, con ayuda de la figura 3.3 y las tablas 3.6 y 3.7, se infiere que con su ocurrencia los daños serían devastadores tanto para la planta como para lugares aledaños, debido a la gran área que abarca; por lo que sería de vital importancia evitar que el mismo ocurra.

Sus afectaciones pueden llegar hasta un máximo de 1300 m en dependencia de la capacidad de la bala donde ocurra el incidente, eso sin contar que el diámetro de la bola de fuego, en cualquiera de los dos casos cubre la planta en su totalidad proporcionando la destrucción total de la misma, por lo que se puede decir que todas las personas que se encuentren presentes en la planta en el momento preciso del accidente, perderán inevitablemente la vida. Solo destacar que si ocurriera un *Bleve* en una bala de 100 m³, solamente quedaría fuera del alcance de la bola de fuego el área de llenado de las balas comerciales, pero de igual manera, las consecuencias serían nefastas tanto para esa área como para el personal que se encuentre ahí en ese momento.

Nuevamente considerando que la planta es abierta y que puede haber personal de la misma y ajena a ella, en diferentes puntos de ubicación en el presunto momento del accidente, se muestra un resumen de la afectación a diferentes distancias de la fuente de emisión. En este caso se realiza el análisis

a partir de los 150 m de distancia debido a que el diámetro de la bola de fuego excede los 100 m.

Tabla 3.9: Porcentaje de muertes probables por efecto de la radiación térmica generada por un *Bleve*.

Distancia (m)	Radiación (W/m ²)	Probit Y	% de Muertes
150	78000	12,55	100
200	80900	12,67	100
250	55600	11,4	100
300	43800	10,58	100
350	32600	9,57	100
400	24900	8,65	100
450	20400	7,97	99,74
500	12900	6,41	92
550	10900	5,83	79,5
600	9110	5,22	58,5

Fuente: Elaboración propia.

Al observar la tabla anterior se puede ratificar lo planteado por Díaz (2013), realmente este escenario tiene un impacto mucho más severo que el anterior, pues incluso a 400 metros del origen morirían la totalidad de las personas presentes. Resulta significativo que su área de peligro letal excede los límites de la planta, por lo que afectaría notablemente el área urbana ubicada a escasos 200 metros de la misma, donde la densidad de población es alta, por lo que morirían una gran cantidad de personas, además que no se puede descartar las afectaciones que sufrirían otras instalaciones de la zona industrial en Matanzas.

Las afectaciones que provocan los valores de radiación a las que pueden estar sometidos los locales y la población afectada por este accidente se pueden ver en el anexo 8.

En la figura 3.4 se muestra el alcance de las radiaciones de las bolas de fuego para una bala de 200 m³.



Figura 3.4: Alcance de las radiaciones del *Bleve* en las de 200 m³.

3.3.4 Determinación del alcance del escenario VCE, para ambos tipos de bala, 100 y 200 m³. En estado de calma

La nube de vapor que puede formarse por un escape de GLP puede trasladarse a la vez que se dispersa (aumentando su área y disminuyendo su concentración) en función de la dirección y la velocidad del viento, ambos factores climatológicos influyen considerablemente sobre las características de este escenario. Esta nube puede encontrarse con una fuente de ignición fija o eventual y transformarse en una nube de vapor explosiva o VCE *Vapour Explotion Could* (Díaz A., 2019).

Este escenario se caracteriza por originar una sobrepresión cuando la nube de gas explota, en la siguiente figura se muestran las áreas de peligro que se originan bajo las condiciones climatológicas correspondientes al mes de enero en estado de calma, teniendo en cuenta que para esta condición climatológica la velocidad de los vientos corresponde a valores menores e iguales a 1 m/s y que el escenario de dispersión no depende de la dirección del viento. Por lo que las áreas de peligros mostradas anteriormente pueden originarse en cualquier dirección, como muestra la línea de confianza.

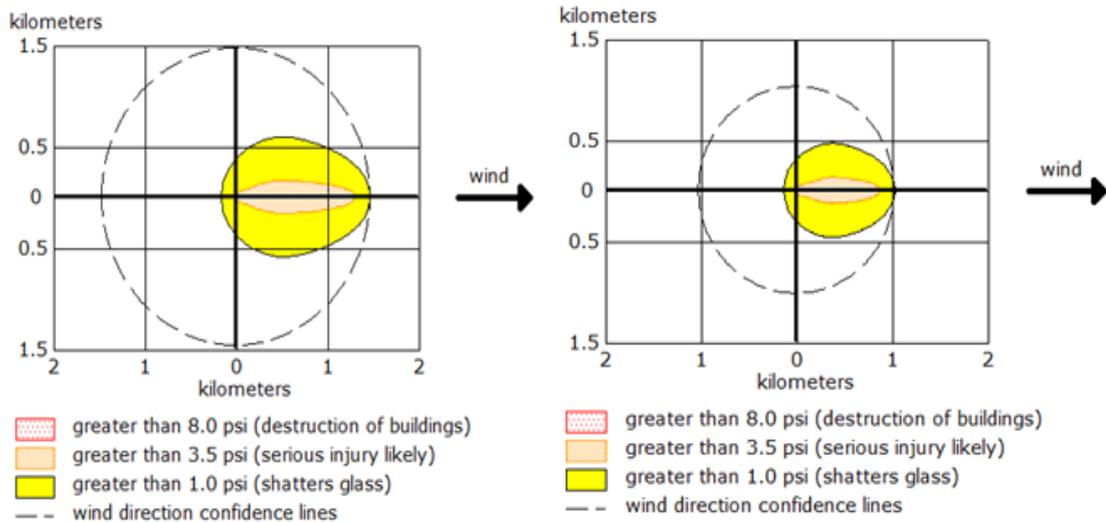


Figura 3.5: Comportamiento de la dispersión de la nube explosiva del GLP en las zonas exteriores con vientos en estado de calma para balas de 200 m³ y 100 m³ respectivamente.

La figura anterior refleja que este escenario solo puede 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 probables serias lesiones respectivamente; no alcanza el efecto provocado por sobrepresiones mayores que 8 psi (LOC-3), que provoca la destrucción de edificios.

Posteriormente se presentan las tablas 3.10 y 3.11 que resumen el alcance de este accidente para las diferentes capacidades estudiadas para las direcciones del viento que mayor y menor frecuencia presentan respectivamente en la zona de estudio, además del estado de calma. Las mismas revelan las variaciones de las dimensiones de las áreas, siendo mayores para la Calma, indicando el predominio de la variable velocidad del viento sobre la dimensión de las áreas, además los resultados obtenidos para los diferentes meses analizados se reportan en los anexos 5 y 6.

Tabla 3.10: Resumen de las extensiones de las áreas de peligro de una VCE para 200 m³ de capacidades y el nivel de sobrepresión para el radio medio de cada área. Estado de calma en el mes de Enero.

Temperatura (°C)		26.1	Enero (Balas de 200 m ³)	
Nubosidad		4		
Humedad (%)		78		
Dirección del viento	Vel Media del Viento (m/s)	Sobrepresión (psi)	Largo (m)	Ancho (m)
E	4,28	LOC-3 (8)	-	-
		LOC-2 (3)	285	75,9
		LOC-1 (1)	491	286
WSW	2,33	LOC-3 (8)	-	-
		LOC-2 (3)	773	130
		LOC-1 (1)	930	460
Calma	≤1	LOC-3 (8)	-	-
		LOC-2 (3)	1300	171
		LOC-1 (1)	1500	601

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.11: Resumen de las extensiones de las áreas de peligro de una VCE para 100 m³ de capacidades y el nivel de sobrepresión para el radio medio de cada área. Estado de calma en el mes de Enero.

Temperatura (°C)		26.1	Enero (Balas de 100 m ³)	
Nubosidad		4		
Humedad (%)		78		
Dirección del viento	Vel Media del Viento (m/s)	Sobrepresión (psi)	Largo (m)	Ancho (m)
E	4,28	LOC-3 (8)	-	-
		LOC-2 (3)	283	86,2
		LOC-1 (1)	488	286
WSW	2,33	LOC-3 (8)	-	-
		LOC-2 (3)	578	110
		LOC-1 (1)	744	400
Calma	≤1	LOC-3 (8)	-	-
		LOC-2 (3)	877	130
		LOC-1 (1)	1000	470

Fuente: Elaboración propia.

Como se pudo observar en el caso del estado en calma, este escenario llega a alcanzar, para 200 m³ de capacidad, en su zona de menor peligro un área circular de 1500 m de diámetro, mientras que la zona de mayor peligro alcanza una longitud de aproximadamente 1300 m y su mayor ancho es aproximadamente 600 m, en cambio, para una capacidad de 100 m³, en su zona de menor peligro un área circular de 1000 m de diámetro, mientras que la zona de mayor peligro alcanza una longitud de 877 m y su mayor ancho es poco menos de 500 m.

En el anexo 7 se puede observar el alcance de la explosión de una nube de vapor, provocada por una bala de 200 m³ de capacidad, para el estado de calma.

3.3.5 Afectación de la sobrepresión de una VCE en la propia Planta de GLP. Estado de calma.

Según Monge (2002), la explosión de una nube de vapor de GLP es un tipo de explosión espectacular y muy peligrosa, la máxima velocidad de propagación de flama ocurre cerca de concentraciones estequiométricas y es generalmente incrementada por una elevada presión, temperatura y turbulencia.

Turmo (2008) asegura que en general las explosiones de nubes de vapor son deflagraciones y en contadas ocasiones se han transformado en detonaciones. La onda de choque que se propaga tiene una serie de características o parámetros que pueden ser medidos y otros que pueden correlacionarse según los daños provocados.

El parámetro generalmente más definido y medido es la sobrepresión generada por la onda de presión no perturbada conforme se propaga a través del aire, mediante la determinación del mismo, es posible realizar los cálculos adecuados que permiten cuantificar los daños proporcionados por este accidente y por ello se realiza el siguiente análisis.

Tabla 3.12: Resultados de la afectación por sobrepresión de una VCE en la propia Planta de GLP para una bala de 200 m³ para el estado de calma.

Lugar	Sobre presión (psia) alcanzada	Afectaciones							
		Muerte por lesión pulmonar		Rotura de tímpano		Muerte por impacto sobre el cuerpo		Lesiones por impactos sobre el cuerpo	
		Valor Pr	% afect	Valor Pr	% afect	Valor Pr	% afect	Valor Pr	% afect
Bala más cercana, o Garita de entrada	1,6	-12,78	< 1	2,37	< 1	-1,23	< 1	2,32	< 1
Bala más cercana	1,67	-12,78	< 1	2,45	< 1	-1,03	< 1	2,51	< 1
Oficina de despacho	1,32	-14,11	< 1	1,99	< 1	-2,16	< 1	1,47	< 1
Oficina control	1,42	-13,60	< 1	2,14	< 1	-1,81	< 1	1,79	< 1
Oficina general	1,28	-14,32	< 1	1,93	< 1	-2,31	< 1	1,33	< 1
Área de llenado	1,05	-15,69	< 1	1,55	< 1	-3,26	< 1	0,45	< 1

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver en la tabla anterior la explosión de una nube de vapor en estado de calma, que es donde mayor radio de alcance tiene este escenario, no afectaría por completo la planta analizada y las personas que se encuentren en los locales de la misma que se verán afectados no estarán sometidos a valores de sobrepresión superiores a los 2 psia (13789.56 N/m²) por lo que no sufrirán muertes por lesiones pulmonares, ni por desplazamiento y colisión del cuerpo contra obstáculos, coincidiendo con los resultados reportados por Wells (2003) que asegura que incluso en balas de almacenamiento de GLP, de una tonelada de capacidad, los daños a las vidas humanas por efecto de la sobrepresión no excede al uno por ciento.

Solo los que se encuentren a escasos metros o en la dirección a la que se desplaza la explosión y estén expuestos a una sobrepresión mayor o igual a los 1.8 psia (12410.60 N/m²), sufrirán múltiples lesiones por rotura de tímpano y por desplazamiento y colisión del cuerpo contra obstáculos.

Considerando que la planta es abierta y que puede haber personal de la misma y ajena a ella, en diferentes puntos de ubicación en el presunto momento del accidente, se muestra un resumen de la afectación a diferentes distancias de la fuente de emisión.

Tabla 3.13: Porcentaje de lesionados probables por efecto de la sobrepresión generada por una VCE para el estado de calma en dirección al norte.

Afectación	Indicadores	Calma						
	Distancia (m)	40	60	80	100	120	140	160
	Sobrepresión (psi)	2,71	2,5	1,85	1,75	1,55	1,47	1,36
Rotura de Tímpano	Índice <i>Probit</i>	3,38	3,23	2,64	2,54	2,3	2,2	2,05
	% afectaciones	5,2	3,6	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Lesiones por impacto	Índice <i>Probit</i>	4,67	4,31	2,97	2,72	2,18	1,95	1,6
	% afectaciones	37	24,5	2,5	1,2	< 1	< 1	< 1

Fuente: Elaboración propia.

Según la tabla 3.13 a medida que aumenta la distancia con respecto al lugar donde ocurre la explosión, el % de personas lesionadas por la ocurrencia de este accidente disminuye, pero no se puede dejar de mencionar que este análisis solo se realizó en dirección al norte y el resultado del mismo variaría en dependencia de las direcciones que se analicen.

3.3.6 Efectos de la sobrepresión de la VCE sobre los equipamientos y las edificaciones de la planta.

Tabla 3.14: Valores de sobrepresión generada, a la que son sometidos algunos equipos y locales, por una VCE para el estado de calma.

Equipos por área	Sobrepresión (psia)	Afectación
5 bombas centrifugas multietapas	6,36	Destrucción completa de todas las estructuras, lo que incluye la ruptura de las balas de almacenamiento y los equipos sometidos a esta sobrepresión, los cuales no soportarían más de 4 psia, sin incluir el efecto domino que aquí no se demuestra.
2 compresores	6,36	
8 Balas de 112m ³	6,36	
13 Balas de 200m ³	6,36	
Oficina de despacho	1,32	Colapso parcial de las paredes y los techos, demolición parcial de las oficinas y daños estructurales menores como rotura de ventanas, rotura de losas y crujidos de los techos y las paredes.
Oficina de control de técnico	1,42	
Oficina general	1,28	
Área de llenado	1,05	

Fuente: Elaboración propia.

Se debe tener en cuenta que los valores de sobrepresión para los equipos fueron tomados considerando que los mismos se encuentran a menos de 22 m de la bala de origen y para los valores de sobrepresión que afecta a los locales se consideraron los valores de distancia reportados en la tabla 3.2 y para las balas se consideró que la bala más lejana de la bala origen está a 42 m el resto está más cerca.

Para una mejor comprensión del análisis realizado, se puede remitir al anexo 9, en cual se nombran las afectaciones que podrían sufrir cada uno de los equipos y locales en dependencia de la sobrepresión a la que son sometidos.

3.3.7 Estimación del impacto económico sobre el equipamiento y la planta.

A pesar de que el software ALOHA no evalúa las consecuencias de la fragmentación de un equipo al destruirse, se puede inferir que la destrucción de

los mismos y de la planta en su totalidad puede ocurrir de acuerdo con los criterios de Wells (2003), por lo que se determinan para esta área las afectaciones pertinentes a los valores de sobrepresión, y se concluye que el costo por reposición de los equipos solamente, puede llegar a ser de \$ 2,140,562.83; mientras que si fuera necesario levantar la planta desde sus cimientos el costo sería de \$ 13 091 465.97, causando una gran pérdida para la economía. Estos valores fueron estimados con ayuda del software CAPCOST y actualizados mediante el índice de costo del 2019.

3.4 Conclusiones parciales

1. De acuerdo con la bibliografía analizada, el escenario que mayor frecuencia de ocurrencia tiene es el *Jet Fire* seguido de la explosión de una nube de vapor.
2. Los escenarios de mayores áreas de atmósferas peligrosas son la nube explosiva y el *BLEVE*.
3. Mediante las ecuaciones *Probit* se determinó que el mayor número de muertes se puede producir bajo los efectos de un *BLEVE* ya que el mismo es el escenario más devastador que puede ocurrir además de afectar a la planta en su totalidad.
4. Bajo condiciones de calma, la explosión de una nube de vapor de GLP provoca las mayores afectaciones al equipamiento y a las edificaciones de la planta.

Conclusiones

1. Se realizó una evaluación sobre el entorno y las personas, mediante herramientas adecuadas para cuantificar el impacto de posibles accidentes por incendio y explosión, que permitió cuantificar los daños provocados por los mismos al medio ambiente y a los recursos humanos.
2. Se determinó el alcance de la afectación de los escenarios: *jet fire*, *BLEVE* y nube explosiva para las velocidades del viento de mayor frecuencia, en dirección al este y al sudoeste, incluyendo el estado de calma.
3. Se determinó que por efecto directo, el *BLEVE*, es el escenario que provoca la mayor cantidad de muertes y que la explosión de la nube de vapor es la que mayores daños materiales ocasiona.
4. Se estimó que en caso de ser necesario reponer totalmente la planta los gastos ascenderían a \$13 091 465,97.

Recomendaciones

1. Ofrecer y discutir los resultados de este trabajo con la dirección de la División Territorial de Comercialización de Combustibles de Matanzas para la elaboración de un plan de prevención y protección ante estos tipos de accidentes.
2. Capacitar a todo el personal vinculado a la planta estudiada sobre la base de los resultados obtenidos en la presente investigación.

Bibliografía

- Aboud, Alyaa. (2008). Planning of petrochemical industry under environmental risk and safety considerations. Waterloo, Ontario, Canadá. [Tesis en opción al grado de Máster de Ciencias Aplicadas en Ingeniería Química. Universidad de Waterloo].
- ARCOPOL. (2011). Manual de usuario ALOHA. Editorial METEOGALICIA-UE. Galicia.
- Azari, P.; Karimi, M. (2017) Quantitative risk mapping of urban gas pipeline networks using GIS. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-4/W4, 2017 Tehran's Joint ISPRS Conferences of GI Research, SMPR and EOEC 2017, 7–10 October 2017, Tehran, Iran.
- Bestratén, M. (1996). NTP 193: Explosiones BLEVE (I): evaluación de la radiación térmica. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales España.
- Blengini, G.A., Blagoeva, D., Dewulf, J., Torres de Matos, C., Nita, V., VidalLegaz, B., Latunussa, C.E.L., Kayam, Y., Talens Peirò, L., Baranzelli, C., Manfredi, S., Mancini, L., Nuss, P., Marmier, A., Alves-Dias, P., Pavel, C., Tzimas, E., Mathieux, F., Pennington, D. and Ciupagea, C. (2017). Assessment of the Methodology for Establishing the EU List of Critical Raw Materials, [Publications Office of the European Union, Luxemburg]. DOI:10.2760/73303, JRC106997.
- Carmenate, Yanay (2018) Evaluación de atmosferas peligrosas en la Terminal-320 de la Empresa Comercializadora de Combustibles Matanzas. [Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico. Universidad de Matanzas].
- Carol, S. (2001). A nine methodology for predicting the severity of industrial accidents. [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona]. España.
- Casal, J. (2002). Análisis del riesgo en instalaciones industriales. España: UPC.

- Casal, J. (2008). Evaluación de los efectos y consecuencias de accidentes mayores en plantas industriales. España: Elsevier.
- Chen, Qinqin; Jia, Qian; Yuna, Zengwei; Huang, Lei. (2013). Environmental risk source management system for the petrochemical industry. Process Safety and Environmental Protection. DOI: 10.1016/j.psep.2013.01.004.
- Conesa, V. (2000). Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental. Madrid. Edición Mundi-prensa.
- Denat, Tom. (2017). Creation of a Biodiversity Severity Index to evaluate the risks of accidental pollutions in the industry: a multi-criteria sorting approach. París. [Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias. Universidad de París].
- Descalzi, Guido (2008). Planta GLP – Camuzzi Gas. [Tesis de grado en Ingeniería Industrial. Instituto Tecnológico de Buenos Aires. Universidad Privada].
- Di Pelino A. (2003). Administración Financiera del Sector Público. Gas licuado de Petróleo (Un enfoque público). [Tesis. Instituto Argentino de la Energía “General Mosconi”].
- Di Pelino, A.; Vianco, G.; Iglesias, F.; Katz, P. y Daniele, M. 2002. Informe sobre la situación actual del Gas Licuado de Petróleo. Informe para el Instituto Argentino de la Energía “General Mosconi”. Ministerio de Economía de la Nación.
- Diaz, A. L. (2013). Análisis de riesgos en el área de almacenamiento de gas licuado del petróleo en la Empresa Comercializadora de Combustibles Matanzas (ECCM) [Tesis presentada para optar el título de Ingeniero Químico. Universidad de Matanzas].
- 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].
- Duarte, G. (2009). SIAFASRL. SIAFASRL. (2009). <http://natlaw.com/interam/ar/eg/rg/rgareg11.htm>.

- Dueñas, Julio A. (2018). Evaluación del impacto económico, ambiental y humano de posibles accidentes provocados por incendios y explosión en la Base de Crudos de La División Territorial de Combustibles de Matanzas. [Tesis presentada para optar el título de Ingeniero Químico. Universidad de Matanzas].
- Dueñas, Julio A. (2020). Predicción del Impacto Económico, Ambiental y Humano debido al carácter continuado de Accidentes de Incendio y Explosión en la Terminal-320 de la División Territorial de Comercialización de Combustibles de Matanzas. [Tesis Presentada como Requisito Parcial para la Obtención del Título de Máster en Ingeniería Asistida por Computadora. Universidad de Matanzas].
- Ferrero, F. (2006). Incendios de hidrocarburos: estudio de la formación y evolución del BOILOVER de capa fina. [Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña]. España.
- Guillen, Eleanys (2020). Análisis de riesgos en el área de almacenamiento de gas licuado del petróleo en la UEB División Territorial de Comercialización de Combustibles de Matanzas. [Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Químico. Universidad de Matanzas.]
- Gunasekera, M y Edwards, D. (2003). Estimating the Environmental Impact of Catastrophic Chemical Release to the Atmosphere, An Index Method for Ranking Alternative Chemical Process Routs. Trans IChemE.
- Hadjisophocleous y Benichou. (2016). Fire safety design guidelines for federal buildings. NRC Publications Archive.
- Jie, Li; Genserik, Reniers; Cozzani, Valerio; Faisal, Khan. (2017). A bibliometric analysis of peer-reviewed publications on domino effects in the process industry.
- Jongejan R.B., Jonkman S.N., Maaskant B. (2010). The potential use of individual and societal risk criteria within the Dutch flood safety policy. (Parte 1): basic principles, in Press. Proceedings of ESREL 2009.
- Lees, F.P. (2012). Loss prevention in the process industries: Hazard identification, assessment and control, fourth edition. ED. Mannan S., Elsevier Butterworth-Heinemann.

- López, Ihosvany. (2010). Evaluación de atmósferas peligrosas en la Zona Industrial de Matanzas ante posibles accidentes químicos. [Trabajo de Diploma en opción al Título de Ingeniero Químico. Matanza].
- López, J. (2017). Análisis cuantitativo de riesgos de tuberías de transporte de sustancias peligrosas [Tesis de Grado en Ingeniería Química, Universidad de Barcelona].
- Manual de usuario del software ALOHA. (2016).
- Monge, Miguel. (2002) Proyecto de instalación de una planta envasadora de gas licuado de petróleo en la ciudad de Arequipa. [Tesis Digitales UNMSM. Universidad nacional mayor de San Marcos]. Repositorio de tesis Ingeniería Industrial. DOI: <https://hdl.handle.net/20.500.12672/1506>
- Motwali, E.G. (2010). Boiling Liquid Expanded Vapor Explosion (BLEVE) Of Petroleum Storage and Transportation facilities. [Thesis Fulfillment of Requirements for Master Degree in Cleaner Production. Sudan Academy of Sciences]. Sudan.
- Moya, B. (2010). Esp. Principal Meteorología. CITMA. Matanzas.
- Mukhim, E.D; Abbasi, T; Tauseef, S.M; Abbasi, S.A. (2018). An Assessment of the Appropriateness of the Prescribed “Safe Distances” for Siting Hazardous Process Units to Prevent Domino Effect. Advances in Fire and Process Safety, DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-7281-9_5.
- Nguyen, M. (2011). Determinación de áreas de peligro potencial que pueden originarse, por incendios y/o explosiones, en la Empresa Comercializadora de Combustibles de Matanzas. [Trabajo de diploma presentado en opción al Título del Ingeniero Químico. Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos. Matanzas. Cuba].
- Nolan, Dennis P. (2011). Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for Oil, Gas, Chemical and Related Facilities. Second edition. Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier. The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford OX5 1GB, UK.

- Nwabueze, Dili. (2016). Liquid hydrocarbon storage tank fires- How prepared is your facility? Chemical Engineering Transactions. DOI: 10.3303/CET1648051. Disponible en: www.aidic.it/cet.
- Piedra, J.P. y Valdivieso, J.P. (2013). Evaluación del riesgo de incendio y explosión en una línea de extrusión de polietileno expandido. [Tesis previa a la obtención del Grado de Magister en Sistemas Integrados de Gestión de la Calidad, Ambiente y Seguridad. Universidad Politécnica Salesiana]. Cuenca Ecuador.
- PNUMA. (1999). Control de riesgos de accidentes mayores. Manual práctico. 2da ed. Ginebra: Ediciones de Oficina Internacional de Trabajo.
- Rojey, A, et al. (1997). *El gas natural: producción, tratamiento y transporte*. Editorial Technip. Paris.
- Roldan, Karla I. (2019). Evaluación del impacto ambiental y humano de posibles accidentes provocados por incendio y/o explosión en la División Territorial de Comercialización de Combustibles de Matanzas. [Tesis presentada en opción al título de ingeniero químico. Universidad de Matanzas].
- Rosero, J.A. (2015). Identificación y evaluación de riesgo de incendio y explosión en el área de almacenamiento de productos limpios, tanque 1020, simulación de efectos en caso de emergencia. [Trabajo realizado como requisito para la obtención del título de Ingeniero en Seguridad y Salud Ocupacional. Quito]. Ecuador.
- Sanmiquel, Lluís; Bascompta, Marc; Rossell; Antiocoi, Hernán; Guash, Eduard. (2018). Analysis of occupational accidents in underground and surface mining in Spain using data-mining techniques. International Journal of Environmental Research and Public Health.
- Sanmiquel, Lluís; Bascompta, Marc; Rossell; Antiocoi, Hernán; Guash, Eduard. (2018). Analysis of occupational accidents in underground and surface mining in Spain using data-mining techniques. International Journal of Environmental Research and Public Health. DOI: 10.3390/ijerph15030462.
- SHOUGESA (2013). Estudio de riesgo Central Térmica San Nicolás. Shougang Generación Eléctrica S.A. Perú.

- Velásquez, W. (2009). Definición del nivel de riesgo del Centro de Almacenamiento y Transporte de Crudo Tejero (CATCT), aplicando la metodología de análisis cuantitativo de riesgos. [Trabajo de Grado Presentado Como Requisito Parcial Para Optar Al Título de Magister Scientiarum en Ingeniería de Mantenimiento. Universidad Gran Mariscal de Ayacucho]. Barcelona.
- Vílchez, Juan A. *et al* (2016) Análisis de riesgos ambientales y aplicación al diseño de instalaciones industriales. Trámites, Informes y Proyectos, S.L. Barcelona.
- Villa, Valeria; Cozzani, Valerio. (2016) Application of Bayesian Networks to Quantitative Assessment of Safety Barriers' Performance in the Prevention of Major Accidents. Chemical Engineering Transactions.
- Villafañe, Diana. V. (2013). Estudio de la dispersión e incendio de nubes inflamables de gas (GNL y GLP) [Tesis de doctorado, Universidad Politecnica de Catalunya]. <https://studylib.es/doc/estudiodeladispersion...>
- Vipin, K.; Pandey, S.K.; Tauseef, S.M.; Abbasi, T.; Abbasi, S.A., 2018. "Pool Fires in Chemical Process Industries: Occurrence, Mechanism, Management". Journal of Failure Analysis and Prevention. DOI: 10.1007/s11668-018-0517-2.
- Wehmeier, Guido; Mitropetros, Konstantinos. (2016). Fire Protection in the Chemistry Industry. Chemical Engineering Transactions. DOI: 10.3303/CET1648044. Disponible en: www.aidic.it/cet.
- Wells, G. (2003). Majors Hazards and their management. Gulf Publishing Company. Houston, Texas.
- Zarranejad, A; Ahmadi, O. (2016) Fire and explosion risk assessment in a chemical company by the application of DOW fire and explosion index
- Zepeda Ramos, O., & González Martínez, S. (2014). Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México. Cenaprend
- Zhou, Yi; Zhao, Xiaogang; Zhao, Jianyu; Chen, Du. (2016). Research on fire and explosion accidents of oil depots. Chemical Engineering Transactions.

Anexos.

Anexo 1: 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 Autoinflamación: = (466 a 405) °C

Coefficiente de expansión: se tiene información

Temperatura de inflamación: propano (466 °C), Butano (405 °C)

Biodegradabilidad: NO

Corrosión: NO, el etilmercaptano, 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							
	Tox. aguda	Irritación	Sensibilización	T. por dosis repetida	Mutagenicidad	Carcinogenicidad	Corrosión	T. para la reproducción
Gas licuado	X	R,O,						

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

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.

Condiciones de almacenamiento y manipulación.

Capacidad del recipiente de almacenamiento: 8 de 100 m³ y 13 de 200 m³.

Forma del recipiente: cilíndrico horizontal con cabezas semiesférica.

Dimensiones del recipiente: 112 m³ (longitud 20 m, diámetro 2,614 m y espesor 21 mm), 200 m³ (longitud 21 m, diámetro 3.40 m 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).

Condiciones de almacenamiento de la sustancia: De forma líquida y presurizada.

Tipo de averías producidas: no se han producido.

Condiciones de almacenamiento (presión, temperatura): P= 5 a 14 kg/cm²,
Temperatura = 10 a 40 °C

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

Condiciones para su uso en el proceso.

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

Condiciones en las que se usa la sustancia (presión, temperatura): P=5 a 14 kg/m², T=10 a 40 °C

Fallos ocurridos en estos equipos al operar con estas sustancias: Roturas de mangueras.

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

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).

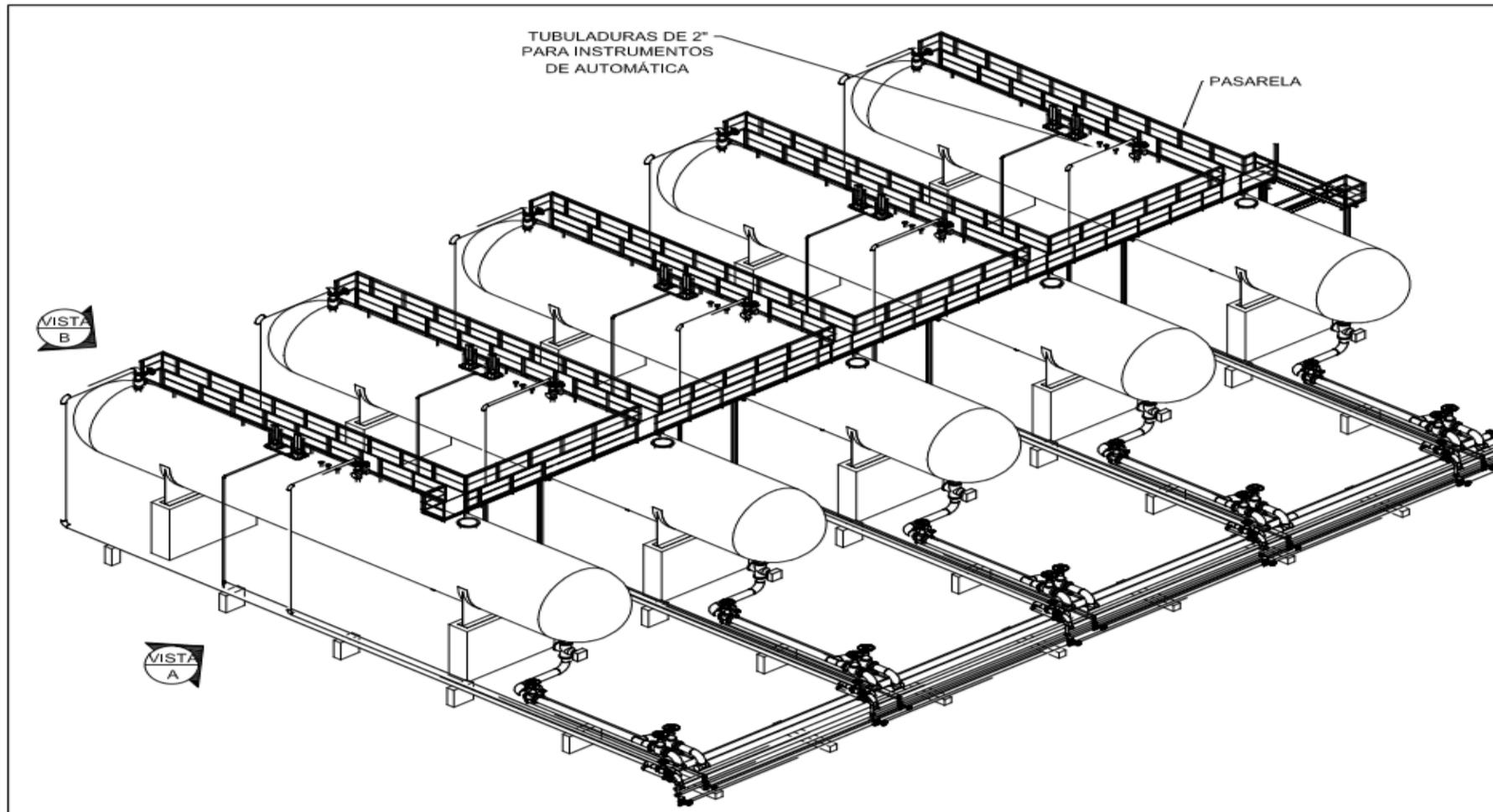
Diámetro de la tubería: URSS – 6 pulgadas., USA – 4 pulgadas.

Cantidad de accesorios y tipos en esa tubería: cinco válvulas y cuatro Instrumentos.

Material de construcción de los accesorios y las tuberías: acero y hierro.

Protección del sistema de tuberías: pintura impermeabilizante.

Anexo 2: Esquema de las balas de Gas Licuado de Petróleo.



Anexo 3: 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 4: Comportamiento de las variables climatológicas para la zona objeto de estudio.

Tabla 4a. 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

Fuente: Moya, (2010).

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 4b 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

Fuente: Moya, (2010).

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 4c: Comportamiento de los valores medio de la temperatura media para la zona

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

Fuente: Moya, (2010).

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

Fuente: Moya, (2010).

Anexo 5: Comportamiento de la sobrepresión generada por la explosión de una nube de vapor en las direcciones Este y Oeste Sudoeste y calma. Balas de 200 m³.

Temperatura (°C)		26.1	Enero (Balas de 200 m ³)	
Nubosidad		4		
Humedad (%)		78		
Dirección del viento	Vel Media del Viento (m/s)	Sobrepresión (psi)	Largo (m)	Ancho (m)
E	4,28	LOC-3 (8)	-	-
		LOC-2 (3)	285	79.3
		LOC-1 (1)	491	283
WSW	2,33	LOC-3 (8)	-	-
		LOC-2 (3)	773	120
		LOC-1 (1)	930	470
Calma	≤1	LOC-3 (8)	-	-
		LOC-2 (3)	1300	160
		LOC-1 (1)	1500	600

Fuente: Elaboración propia.

Temperatura (°C)		26.1	Abril (Balas de 200 m ³)	
Nubosidad		4		
Humedad (%)		78		
Dirección del viento	Vel Media del Viento (m/s)	Sobrepresión (psi)	Largo (m)	Ancho (m)
E	4,28	LOC-3 (8)	-	-
		LOC-2 (3)	308	82.8
		LOC-1 (1)	521	297
WSW	2,33	LOC-3 (8)	-	-
		LOC-2 (3)	820	140
		LOC-1 (1)	987	480
Calma	≤1	LOC-3 (8)	-	-
		LOC-2 (3)	1300	170
		LOC-1 (1)	1500	610

Fuente: Elaboración propia.

Temperatura (°C)		26.1	Julio (Balas de 200 m ³)	
Nubosidad		4		
Humedad (%)		78		
Dirección del viento	Vel Media del Viento (m/s)	Sobrepresión (psi)	Largo (m)	Ancho (m)
E	4,28	LOC-3 (8)	-	-
		LOC-2 (3)	317	86.2
		LOC-1 (1)	536	303
WSW	2,33	LOC-3 (8)	-	-
		LOC-2 (3)	627	120
		LOC-1 (1)	814	440
Calma	≤1	LOC-3 (8)	-	-
		LOC-2 (3)	1100	160
		LOC-1 (1)	1300	580

Fuente: Elaboración propia.

Temperatura (°C)		26.1	Octubre (Balas de 200 m ³)	
Nubosidad		4		
Humedad (%)		78		
Dirección del viento	Vel Media del Viento (m/s)	Sobrepresión (psi)	Largo (m)	Ancho (m)
E	4,28	LOC-3 (8)	-	-
		LOC-2 (3)	309	86.2
		LOC-1 (1)	524	300
WSW	2,33	LOC-3 (8)	-	-
		LOC-2 (3)	826	140
		LOC-1 (1)	994	490
Calma	≤1	LOC-3 (8)	-	-
		LOC-2 (3)	1300	170
		LOC-1 (1)	1500	600

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 6: Comportamiento de la sobrepresión generada por la explosión de una nube de vapor en las direcciones Este y Oeste Sudoeste y calma. Balas de 100m³

Temperatura (°C)		26.1	Enero (Balas de 100 m ³)	
Nubosidad		4		
Humedad (%)		78		
Dirección del viento	Vel Media del Viento (m/s)	Sobrepresión (psi)	Largo (m)	Ancho (m)
E	4,28	LOC-3 (8)	-	-
		LOC-2 (3)	283	82,8
		LOC-1 (1)	488	286
WSW	2,33	LOC-3 (8)	-	-
		LOC-2 (3)	578	120
		LOC-1 (1)	744	400
Calma	≤1	LOC-3 (8)	-	-
		LOC-2 (3)	877	130
		LOC-1 (1)	1000	480

Fuente: Elaboración propia.

Temperatura (°C)		26.1	Abril (Balas de 100 m ³)	
Nubosidad		4		
Humedad (%)		78		
Dirección del viento	Vel Media del Viento (m/s)	Sobrepresión (psi)	Largo (m)	Ancho (m)
E	4,28	LOC-3 (8)	-	-
		LOC-2 (3)	306	82,8
		LOC-1 (1)	519	297
WSW	2,33	LOC-3 (8)	-	-
		LOC-2 (3)	818	440
		LOC-1 (1)	956	120
Calma	≤1	LOC-3 (8)	-	-
		LOC-2 (3)	1000	140
		LOC-1 (1)	1100	500

Fuente: Elaboración propia.

Temperatura (°C)		26.1	Julio (Balas de 100 m ³)	
Nubosidad		4		
Humedad (%)		78		
Dirección del viento	Vel Media del Viento (m/s)	Sobrepresión (psi)	Largo (m)	Ancho (m)
E	4,28	LOC-3 (8)	-	-
		LOC-2 (3)	315	82,6
		LOC-1 (1)	533	307
WSW	2,33	LOC-3 (8)	-	-
		LOC-2 (3)	840	120
		LOC-1 (1)	986	440
Calma	≤1	LOC-3 (8)	-	-
		LOC-2 (3)	1000	130
		LOC-1 (1)	1100	470

Fuente: Elaboración propia.

Temperatura (°C)		26.1	Octubre (Balas de 100 m ³)	
Nubosidad		4		
Humedad (%)		78		
Dirección del viento	Vel Media del Viento (m/s)	Sobrepresión (psi)	Largo (m)	Ancho (m)
E	4,28	LOC-3 (8)	-	-
		LOC-2 (3)	307	79
		LOC-1 (1)	521	293
WSW	2,33	LOC-3 (8)	-	-
		LOC-2 (3)	822	130
		LOC-1 (1)	969	440
Calma	≤1	LOC-3 (8)	-	-
		LOC-2 (3)	1000	130
		LOC-1 (1)	1200	470

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 7: Alcance de la explosión de una nube de vapor, provocada por una bala de 200 m³ de capacidad, para el estado de calma.



Anexo 8: Daño según flujo térmico recibido.

Radiación térmica kW/m²	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.

Anexo 9: Afectaciones 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

Fuente: Wells, (2003).