

**EVALUACIÓN DE LOS RIESGOS DE INCENDIO Y EXPLOSIÓN EN EL
ALMACENAMIENTO DE GASOLINA EN GRANJAS DE TANQUES MEDIANTE
EL ANÁLISIS DE CAPAS DE PROTECCIÓN (LOPA)**

MARTHA JULIANA MENESES AMAYA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2007**

**EVALUACIÓN DE LOS RIESGOS DE INCENDIO Y EXPLOSIÓN EN EL
ALMACENAMIENTO DE GASOLINA EN GRANJAS DE TANQUES MEDIANTE
EL ANÁLISIS DE CAPAS DE PROTECCIÓN (LOPA)**

MARTHA JULIANA MENESES AMAYA

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Químico**

Director:

Dr. M. SAM MANNAN, PE, CSP

Codirector:

Dr. ÁLVARO RAMÍREZ GARCÍA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2007**

AGRADECIMIENTOS

Al Doctor Álvaro Ramírez García, Director de Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander, por creer en mi, por su gran apoyo y cariño.

Al Doctor M. Sam Mannan, Director del MKOPSC, por su don de gente e inmensa disposición para la orientación del presente trabajo.

Al Doctor Kenneth Hall, Director del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Texas A&M, por darme la oportunidad de vivir una experiencia de aprendizaje como de crecimiento personal.

A los miembros del grupo de investigación MKOPSC, por su apoyo en el desarrollo del presente trabajo.

Dedicatoria

*A DIOS por sus bendiciones sin fin, por mostrarme el camino con su poderosa luz
y sencillamente por ser lo más importante en toda mi vida.*

*A mi mamá y a mi abuelita por ser tan amorosas, sabias y darme con su ejemplo
las enseñanzas más importantes de la vida.*

*A mi hermano por su gran fortaleza e inteligencia, y por sus ideas en el momento
adecuado.*

*A mi sobrinita, Marianita, por ser tan perspicaz, especial y transmitirme la alegría y
tranquilidad en todo momento.*

*A mi padre porque a pesar de no estar físicamente, siempre sentí parte de él en
mí.*

*A mi tía Mariela y a mi tío German por darme gran amor y apoyo, y a toda mi
familia por su afecto.*

*A mis amigos por su cariño sincero, compañía y por darme la oportunidad de
aprender algo de cada uno de ellos.*

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	
1. ASPECTOS GENERALES	3
1.1. PROCESO DE ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES EN GRANJAS DE TANQUES	3
1.2. TANQUES DE ALMACENAMIENTO	4
1.3. MANEJO DE LA GASOLINA	4
1.4. ANÁLISIS DE CAPAZ DE PROTECCIÓN (LOPA)	5
2. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO MEDIANTE LOPA	6
2.1. DESARROLLO DE LOS ESCENARIOS DE LOS ACCIDENTES	6
2.1.1 Identificación de los eventos iniciantes y su frecuencia de ocurrencia	6
2.1.2 Estimación de la severidad de las consecuencias	6
2.1.2.1. Estimación de los perjuicios ocasionados.	9
2.1.2.2. Categorización de las consecuencias	9
2.2. DETERMINACIÓN DE LA FRECUENCIA DEL ESCENARIO	10
2.2.1. Selección de las salvaguardas consideradas como IPLs.	10
2.2.2. Determinación de la probabilidad de ignición.	11
2.2.3. Cálculo de la frecuencia del escenario	11
2.2.4. Categorización de la frecuencia del escenario	11
2.3. ESTIMACIÓN Y EVALUACIÓN DEL RIESGO DEL ESCENARIO	11
3. ESPECIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS	14

3.1 ESCENARIOS IDENTIFICADOS EN EL ALMACENAMIENTO DE LA GASOLINA EN GRANJAS DE TANQUES	14
3.1.1. Escenario 1. Sobrellenado de un tanque	14
3.1.2. Escenario 2. Ruptura de la línea de salida del tanque	14
3.1.3. Escenario 3. Ruptura o desajuste cabal del brazo de carga de un camión cisterna	15
3.1.4. Escenario 4. Agujero en la pared del tanque	15
3.1.5. Escenarios 5. Ruptura catastrófica del tanque debido a un terremoto.	15
3.1.6. Escenario 6. Ruptura catastrófica del tanque debido a el impacto de un carro-tanque.	16
3.2 CONTEXTO DONDE SE DESARROLLAN LOS ESCENARIOS	16
3.2.1. Descripción de la Granja de tanques y sus alrededores	16
3.2.2 Condiciones y características del almacenamiento	16
4. RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA	18
4.1 DESARROLLO DE LOS ESCENARIOS DE LOS ACCIDENTES	18
4.1.1 Eventos iniciantes y sus frecuencias de ocurrencia	19
4.1.2. Severidad de las consecuencias de los escenarios	19
4.1.2.1. Distancias alcanzadas por los efectos de los eventos peligrosos	19
4.1.2.1.1 Alcances de la dispersión de la nube inflamable	19
4.1.2.1.2. Alcances de la radiación de la piscina de fuego de la gasolina	20
4.1.2.1.3. Alcances de la sobrepresión de la explosión de la nube de vapor	21
4.1.2.2. Perjuicios ocasionados	22
4.1.2.3. Categoría de las consecuencias	22
4.2 FRECUENCIA DE LOS ESCENARIOS	22

4.2.1. Salvaguardas consideradas como IPLs	22
4.2.3. Categoría de la frecuencia del escenario	26
4.3. RIESGOS SOBRE EL PERSONAL Y LA COMUNIDAD	27
4.3.1. Riesgo de incendio (piscina de fuego) sobre el personal	27
4.3.2. Riesgo de incendio (piscina de fuego) sobre la comunidad	29
4.3.3. Riesgo de explosión (explosión de la nube de vapor no confinada) sobre el personal	30
4.3.4. Riesgo de explosión (explosión de la nube de vapor no confinada) sobre la comunidad	31
CONCLUSIONES	33
RECOMENDACIONES	34
BIBLIOGRAFÍA	35
ANEXOS	36

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Categorías de las consecuencias sobre el personal dentro las instalaciones	10
Tabla 2. Categorías de las consecuencias sobre la comunidad fuera de las instalaciones	10
Tabla 3. Categorización de la frecuencia de ocurrencia del escenario	12
Tabla 4. Matriz de riesgo	13
Tabla 5. Condiciones y características del almacenamiento en el momento de los incidentes	17
Tabla 6. Eventos iniciantes identificados y frecuencia de los mismos	18
Tabla 7. Condiciones utilizadas para las simulaciones	19
Tabla 8. Alcances de la nube de vapores inflamables de la gasolina	20
Tabla 9. Alcances de la piscina de fuego de gasolina	21
Tabla 10. Alcances de la explosión de la nube de vapor de gasolina	21
Tabla 11. Consecuencias sobre personal por la piscina de fuego y la explosión de la nube de vapor de la gasolina	23
Tabla 12. Consecuencias sobre la comunidad por la piscina de fuego y la explosión de la nube de vapor de la gasolina	23
Tabla 13. Salvaguardas consideradas IPLs	24
Tabla 14. Probabilidades de ignición para la piscina de fuego y la explosión de la nube de vapor	26
Tabla 15. Frecuencia de los escenarios	27
Tabla 16. Matriz de riesgo de incendio sobre el personal	28
Tabla 17. Matriz de riesgo de incendio sobre la comunidad	29
Tabla 18. Matriz de riesgo de explosión sobre el personal	30
Tabla 19. Matriz de riesgo de explosión sobre la comunidad	31

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de distribución del petróleo y sus combustibles derivados	4
Figura 2. Granja de tanques	5
Figura 3. Tanque de techo flotante	5
Figura 4. Metodología utilizada para evaluar el riesgo mediante LOPA	8
Figura 5. Árbol de decisión para la determinación de la probabilidad de ignición	25

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Incidentes ocurridos con líquidos inflamables	36
ANEXO B. Propiedades de la gasolina	39
ANEXO C. Peligros asociados a la gasolina	40
ANEXO D. CANARY by Quest®	43
ANEXO E. Efectos de los eventos peligrosos	47
ANEXO F. Mapa de la granja de tanques donde se desarrollan los incidentes	50

RESUMEN

TITULO: “EVALUACIÓN DE LOS RIESGOS DE INCENDIO Y EXPLOSIÓN EN EL ALMACENAMIENTO DE GASOLINA EN GRANJAS DE TANQUES MEDIANTE EL ANÁLISIS DE CAPAS DE PROTECCIÓN (LOPA)”*

AUTOR: MENESES AMAYA, Martha**

PALABRAS CLAVES: LOPA, Incendio, Explosión, Granja de Tanques, Tanque, Gasolina.

DESCRIPCIÓN:

Los posibles incidentes que pueden ocurrir en el proceso del almacenamiento de la gasolina en granjas de tanques representan un gran riesgo, debido a las grandes cantidades confinadas en un mismo lugar y a los peligros intrínsecos de este inflamable. Aunque estos riesgos incluyen consecuencias indeseadas, es necesario evaluarlo, y de esta manera conocer si es necesario tomar medidas para la reducción del mismo.

En el presente trabajo se evaluaron los riesgos de incendio y explosión del almacenamiento de gasolina en granjas de tanques sobre el personal perteneciente a las instalaciones y la comunidad de los alrededores, mediante un Análisis de Capas de Protección (LOPA). Se estimó la severidad de las consecuencias a seis escenarios particulares, para los cuales la ruptura del tanque debido a un terremoto y al impacto de un carro tanque, y el sobrellenado del tanque, fueron categorizados con las consecuencias mas altas. Posteriormente, se determinó la frecuencia de los escenarios, teniendo en cuenta la selección de las capas independientes de protección, para finalmente determinar y evaluar el riesgo, mediante el desarrollo de matrices el cual fue mayor para el sobrellenado del tanque.

Finalmente, con base a los resultados obtenidos en este trabajo se elaboraron las conclusiones y recomendaciones, con la intención de que análisis de este tipo sean realizados en la industria, contribuyendo de esta manera a la ejecución de procesos más seguros.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería Química.
Director: M. Sam Mannan, PhD.

ABSTRACT

TITLE: “FIRE AND EXPLOSION RISK ASSESSMENT ON GASOLINA STORAGE IN TANK FARMS USING LAYER OF PROTECTION ANALYSIS (LOPA)”**

AUTHOR: MENESES AMAYA, Martha**

KEY WORDS: LOPA, Fire, Explosion, Tank farms, Tank, Gasolina.

DESCRIPTION:

The possible incidents that can occur in the gasoline storage process represent a major risk, due to the large amount confined in the same place and intrinsic hazards of this flammable. Although, these risks have to include undesirable consequences, it is necessary assessment it and in this way to know if it has to take measures to reduce it.

Fire and explosion risks on gasoline storage in tank farms, over the facility personnel and the surroundings community using Layer of Protection Analysis (LOPA) method were assessment in this paper. Severities of consequences were estimated to six particular scenarios. The tank rupture due to earthquake and the tank rupture due to the impact of a tanker, and tank overfilling due to failures on the basic process control systems were categorized the incidents with major consequences. Later, the scenario frequencies were determined taking into account the safeguards that can be independent layers of protection. Then, matrices were developed to determine and assess the risk level. The tank overfilling due to failures on the basic process control systems was the scenario with major risk.

Finally, conclusions and recommendations were made based on the results obtained from this paper, with the intension that this kind of analysis will be implemented in the industry and in this way contributing to performance to more safety process in the general industry.

* Graduation project

** Physical-Chemical Engineering Faculty, Chemical Engineering Department.
Director: M. Sam Mannan, PhD.

INTRODUCCIÓN

El proceso de almacenamiento de combustibles líquidos derivados del petróleo, en granjas de tanques, representa un gran peligro de incendio y explosión por las enormes cantidades de combustible manejadas en un mismo lugar, lo que ha conllevado a incidentes en los que se ven involucradas este tipo de sustancias, los cuales dejan pérdidas económicas representadas tanto en la cantidad de combustible perdido como en los daños materiales, y perjuicios sobre las personas en el interior de las instalaciones y/o en la comunidad de los alrededores. Tal es el caso de uno de los incidentes más recientes ocasionado por liberación de gasolina, como el que ocurrió en Inglaterra en Diciembre de 2005 en una granja de tanques o depósito de almacenamiento denominado Buncefield, que despertó el interés del mundo y en el Mary Kay O'Connor Process Safety Center, donde se tuvo la oportunidad de realizar el presente estudio, y ha sido calificado como el peor incendio en Europa desde la Segunda Guerra Mundial (ver anexo A).

A pesar que la gasolina se considera como un hidrocarburo pesado, por el hecho que contenga butano y pentano, entre otros componentes livianos, representa uno de los líquidos inflamables más peligrosos como desencadenante de incendios y explosiones, con sus asociados efectos de radiación y sobrepresión respectivamente, que desembocan en indeseadas consecuencias.

Sumado a lo anterior la gasolina sigue siendo uno de los combustibles más utilizados en el mundo y por la continua presión ejercida por la EPA para reducir las emisiones contaminantes y cumplir con las normas nacionales relativas al ozono, muchos países y estados han establecido sus propias especificaciones y en la actualidad, las refinerías ofrecen a sus clientes diferentes tipos de gasolina. Esto conlleva a que se deba aumentar la capacidad en las tuberías, tanques de

almacenamiento y carro tanques para no restringir ni limitar el sistema de distribución de estos productos.

Por lo tanto, es importante alcanzar una mayor seguridad del almacenamiento de la gasolina en este tipo de instalaciones mediante una estimación y evaluación de los posibles riesgos para conocer si es necesario tomar medidas ante escenarios particulares, que junto con estudios de factibilidad, se pueda llevar a cabo un manejo práctico del riesgo en la industria petrolera, para reducir los impactos de posibles incidentes que puedan ocurrir en el futuro, o evitar la ocurrencia de los mismos [8].

En este documento se presenta la estimación y evaluación de los riesgos de incendio y explosión sobre el personal y la comunidad en el almacenamiento de la gasolina en una granja de tanques, para escenarios de incidentes particulares, mediante un Análisis de Capas de Protección (LOPA), y adicionalmente se dan algunas sugerencias para la posible reducción del riesgo en este tipo de instalaciones. El contenido del informe está organizado de la siguiente forma: en el primer capítulo se refieren generalidades acerca del almacenamiento de la gasolina y el método de Análisis de Capas de Protección (LOPA). En el segundo capítulo se presenta una descripción de la metodología y los criterios empleados en la implementación de la misma. En el tercer capítulo se describen los escenarios de los incidentes seleccionados y el contexto en que se considera que estos ocurren. En el capítulo cuatro se muestran los resultados de la implementación de la metodología, junto con el análisis y evaluación de las estimaciones del riesgo obtenidas para los escenarios particulares. Por último, se plantean las conclusiones y recomendaciones correspondientes.

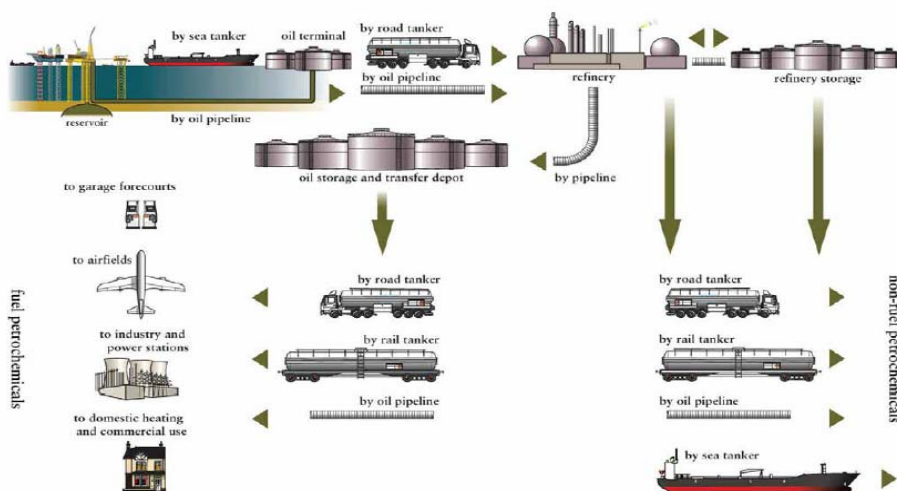
1. ASPECTOS GENERALES

1.1. PROCESO DE ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES EN GRANJAS DE TANQUES

El almacenamiento y entrega de los combustibles derivados del petróleo a los consumidores finales son importantes procesos en la economía de un país, por lo tanto las refinerías tienen espacios destinados al almacenamiento de estos productos que van a ser retirados de la refinería. Sin embargo, dada la localización de las refinerías respecto los diferentes destinos, se disponen grandes terminales y granjas de tanques de almacenamiento a lo largo del territorio de los países productores y/o consumidores de estos productos, generalmente localizados cerca a urbanizaciones. Estas terminales son principalmente abastecidas desde las refinerías a través de tuberías, mediante ferrocarriles o por vía marítima; y se manejan como empresas conjuntas entre un número de compañías petroleras. En la figura 1. se muestran los lugares de almacenamiento y depósitos de transferencias en el sistema de distribución petrolero [12].

Las granjas de tanques, comprenden sistemas de recibo, almacenamiento, control de presión e inventariado y despacho de los diferentes productos, a los que se les realizan pruebas de recertificación, donde se verifica que no han variado sus características y/o propiedades, y que continúan cumpliendo con las normas establecidas. Una vez que el producto se pone a la venta, se realizan muestreos diarios para asegurar calidad al cliente. En la figura 2. se muestra una típica granja de tanques.

Figura 1. Sistema de distribución del petróleo y sus combustibles derivados



1.2. TANQUES DE ALMACENAMIENTO

Los líquidos inflamables y combustibles derivados del petróleo son almacenados en tanques subterráneos y sobre tierra. Los tanques de almacenamiento se definen como cualquier recipiente de almacenamiento de líquidos que tenga una capacidad superior a 60 galones (227 L), y sea diseñado para una instalación fija sin la intención de que en su interior se efectúen procesos diferentes a los ocurridos durante el almacenamiento [10].

Los tanques de interés en este trabajo son los de almacenamiento atmosférico sobre tierra. Ver figura 3. Estos tanques pueden ser de diferentes tipos dependiendo de la sustancia almacenada. Para el almacenamiento del petróleo y la gasolina se utilizan tanques de techo flotante internos o externos, es decir, con techo fijo adicional, dependiendo de las condiciones climáticas donde se encuentre dicho tanque.

Figura 2. Granja de tanques



Figura 3. Tanque de techo flotante



El techo flotante interno ayuda a disminuir la pérdida de combustible, para así tratar de evitar incidentes por la ignición de sus vapores o reclamos por parte del cliente por la disminución en la cantidad del producto [9].

Estos tanques están equipados con instrumentos de medición del nivel, para el control de inventariado, y adicionalmente pueden tener alarmas de alto nivel y sistemas de shutdown, sensores de temperatura, entre otros.

2.3. MANEJO DE LA GASOLINA

La gasolina está clasificada como un líquido inflamable clase 1A de acuerdo con la NFPA (National Fire Protection Association) [10], razón por la cual debe tenerse especial cuidado en su manejo, ya que genera vapores desde una temperatura de -43°C , los cuales al mezclarse con aire en proporciones de 1.1 a 7.6% en volumen producen mezclas inflamables y explosivas. Adicionalmente, debido a que estos vapores generados tienen una densidad aproximadamente tres veces mayor que la del aire, tienden a depositarse en lugares bajos donde están localizadas normalmente las fuentes de ignición tales como interruptores de corriente eléctrica, tomas de corriente y puntos calientes tales como lámparas

incandescentes, los cuales pueden producir incendios y explosiones. En el anexo B se resumen las propiedades de la gasolina consideradas para la realización de este proyecto y en el anexo C se muestran los peligros de incendio y explosión de la gasolina.

1.4. ANÁLISIS DE CAPAS DE PROTECCIÓN (LOPA)

LOPA es una herramienta semicuantitativa para analizar y evaluar el riesgo. Es decir, es una forma simplificada de evaluar el riesgo, que se construye típicamente sobre la información desarrollada durante una evaluación cualitativa del peligro o también puede ser utilizado para analizar escenarios que se originan de cualquier fuente, incluyendo análisis de una opción de diseño e investigación de incidentes.

Para desarrollar los escenarios mediante LOPA, se debe establecer tan solo un par evento iniciante – consecuencia, y se realiza la estimación de esta consecuencia, generalmente por juicios cualitativos de personas con la suficiente experiencia en el tema. Luego se evalúa si las salvaguardas presentes pueden ser consideradas como Capas Independientes de Protección (IPLs). Dado que, una salvaguarda es cualquier dispositivo, sistema, o acción que podría llegar a interrumpir la cadena de eventos seguidos a un evento iniciante, estas pueden ser consideradas como IPLs sí y solo sí, cumplen con determinados requisitos tales como, efectividad en prevenir la consecuencia, respecto al diseño y detección de la condición ante la que se requiere actuar, independencia del evento iniciante u otra IPL, y auditoría, en lo concerniente al mantenimiento y funcionalidad de las mismas. Con base en estas condiciones se puede determinar la frecuencia del escenario para finalmente estimar y evaluar el riesgo.

De esta manera, LOPA proporciona una base consecuente para juzgar si hay suficiente IPLs para controlar el riesgo de un accidente para un escenario dado. Si el riesgo estimado de un escenario no es aceptable, se pueden agregar IPLs adicionales.

2. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO MEDIANTE LOPA

En la figura 4. se sintetiza la metodología utilizada en este estudio para la estimación y evaluación del riesgo de incendio y explosión del almacenamiento de la gasolina en una granja de tanques, por medio del análisis de capas de protección. Esta metodología esta hecha con base a LOPA [1] y exLOPA [7]

2.1. DESARROLLO DE LOS ESCENARIOS DE LOS ACCIDENTES

Previo al desarrollo de los escenarios se realizó la especificación y descripción de los mismos con base en los peligros que representa la gasolina como tal, mostrados en el anexo C, y a diferentes análisis de peligros particulares para determinadas granjas de tanques en la industria petrolera; también se tomaron como referencia accidentes reportados en la literatura relacionados con el almacenamiento de líquidos inflamables ocurridos en el pasado.

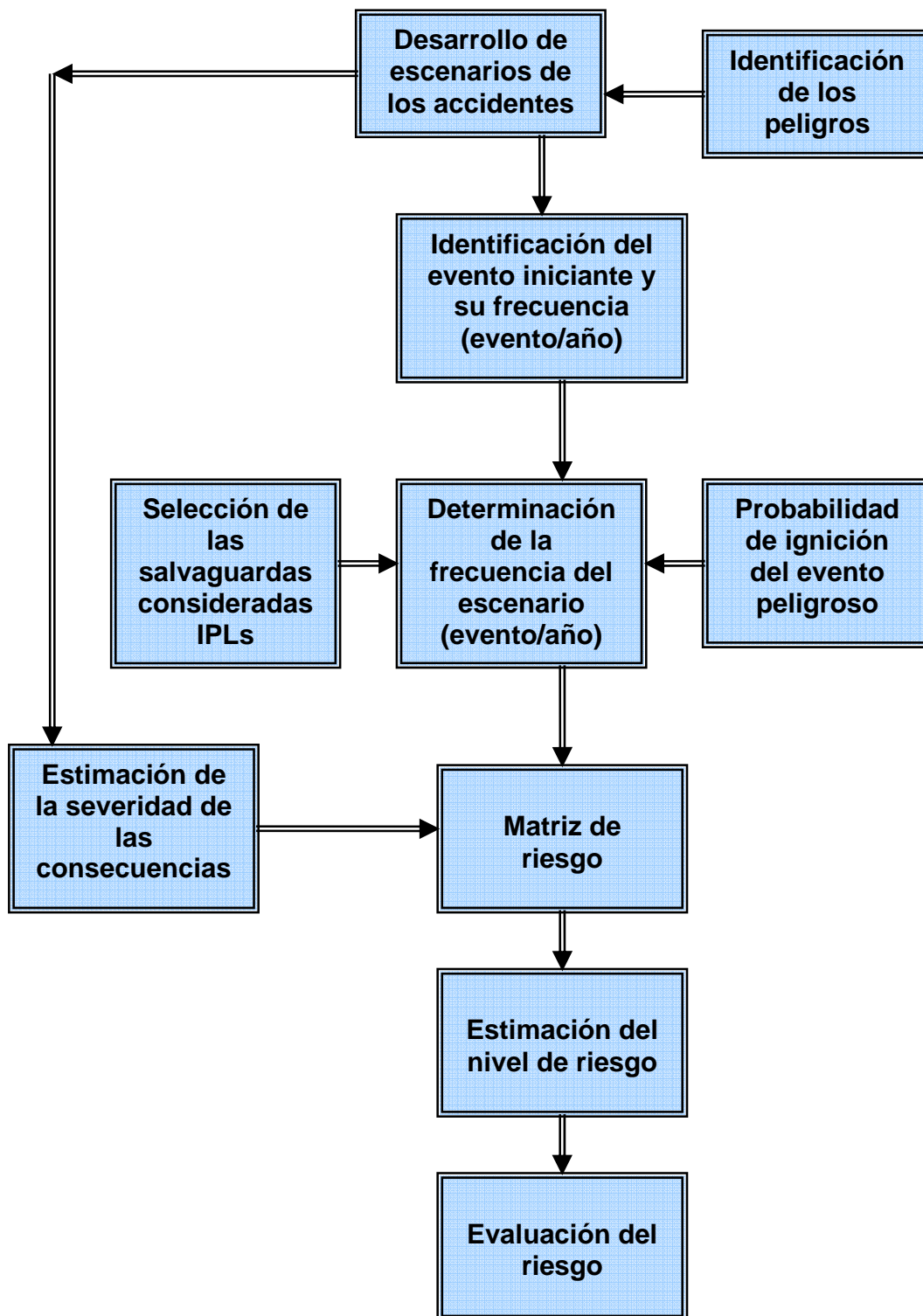
2.1.1. Identificación de los eventos iniciantes y su frecuencia de ocurrencia.

La frecuencia de los eventos iniciantes fue obtenida de diferentes fuentes de la literatura, ya que el grado de precisión requerido por lo LOPA no exige la utilización de árboles de falla para la determinación del mismo, como si lo puede requerir el Análisis Cuantitativo de Riesgos (QRA), dependiendo del caso.

2.1.2. Estimación de la severidad de las consecuencias.

El análisis de consecuencia se realizó para los eventos peligros correspondientes a la piscina de fuego, dispersión de la nube y la explosión de la nube no confinada de la gasolina. Aunque en el análisis de capas de protección la estimación de las consecuencias generalmente se realiza mediante juicios cualitativos, esto solo lo puede hacer alguien con la suficiente experiencia y conocimiento en incidentes del mismo tipo.

Figura 4. Metodología utilizada para evaluar el riesgo mediante LOPA



Por lo tanto, para el presente estudio fue necesario utilizar como herramienta un software denominado CANARY, el cual fue suministrado y puesto a disposición por el Mary Kay O'connor Process Safety Center. Este software es descrito brevemente en el anexo D. Los resultados obtenidos por las diferentes corridas realizadas para los distintos escenarios, suministran los diferentes alcances de los efectos peligrosos en términos de distancia en la dirección del viento tales como dispersión de la nube de vapor inflamable, alcance de la radiación emitida por la piscina de fuego de la gasolina y alcances de la sobre presión provenientes de la ignición retardada de la nube de vapor inflamable dispersa.

2.1.2.1. Estimación de los perjuicios ocasionados. A partir de los alcances de la radiación de la piscina de fuego y de la sobre presión proveniente de la explosión de la nube de vapor no confinada, se pueden establecer los posibles perjuicios, o molestias, ocasionadas a las personas dentro y fuera de la granja de tanques, con base a estimaciones establecidas como referencia de los daños y perjuicios que ocasionan determinados valores de radiación o sobrepresión, según corresponda, las cuales se muestran en el anexo E.

Para el caso del incendio en estudio, se considera que el tiempo de exposición de las personas es mayor a 10 segundos pero menor a 1 minuto, sin ninguna clase de protección o enfriamiento.

2.1.2.2. Categorización de las consecuencias. Dependiendo de los perjuicios ocasionados a las personas dentro y fuera de las instalaciones, se realizó la categorización de las consecuencias. Estas categorías son mostradas en las tablas 1 y 2, respectivamente.

Tabla 1. Categorías de las consecuencias sobre el personal dentro las instalaciones

CATEGORÍA DE LA SEVERIDAD	DESCRIPCIÓN
I. Baja	Heridos leves o no heridos, sin detenimiento de sus actividades laborales
II. Mediana	Solo heridos, no graves; posible detenimiento de sus actividades laborales
III. Alta	Uno o más heridos graves
IV. Catastrófica	Heridos permanentemente inhabilitados o fatalidades

Tabla 2. Categorías de las consecuencias sobre la comunidad fuera de las instalaciones

CATEGORÍA DE LA SEVERIDAD	DESCRIPCIÓN
I. Baja	Ninguna clase de heridos, peligro o molestia a la comunidad
II. Mediana	Reclamos por parte de la comunidad acerca de olores o ruidos
III. Alta	Uno o más heridos leves
IV. Catastrófica	Uno o más heridos graves

2.2. DETERMINACIÓN DE LA FRECUENCIA DEL ESCENARIO

2.2.1. Selección de las salvaguardas consideradas como IPLs. Los criterios para determinar si las salvaguardas pueden ser consideradas como IPLs son: efectividad en prevenir la consecuencia, respecto al diseño y detección de la condición ante la que se requiere actuar, independencia del evento iniciante u otra

IPL, y auditoria, en lo concerniente al mantenimiento y funcionalidad de las mismas.

2.2.2. Determinación de la probabilidad de ignición. La determinación de la probabilidad de ignición se realizó mediante árboles de decisión, dependiendo de si la ignición es inmediata o retardada, y de las distancias alcanzadas por la nube dispersa, dependiendo del escenario en particular.

2.2.3. Cálculo de la frecuencia del escenario. La determinación de la frecuencia del escenario se realizó con base a la frecuencia del evento iniciante, la Probabilidad de Falla en Demanda (PFD) de las posibles capas independientes de protección (IPLs) y de la probabilidad de ignición, según sea el caso.

$$f_i^C = f_i^I \times \left(\prod_{j=1}^J PFD_{ij} \right) \times P^{ignicion}$$

f_i^C es la frecuencia del escenario del accidente

f_i^I es la frecuencia del evento iniciante del i

PFD_{ij} es la probabilidad de falla en demanda de la IPL j que protege contra la consecuencia C del evento iniciante i

$P^{ignicion}$ es la probabilidad de ignición

2.2.4. Categorización de la frecuencia del escenario. El criterio utilizado para esta categorización se muestra en la tabla 3.

2.3. ESTIMACIÓN Y EVALUACIÓN DEL RIESGO DEL ESCENARIO.

La categorización de la frecuencia y la asociada severidad de la consecuencia, son usadas para la estimación y evaluación el riesgo, mediante el desarrollo de la matriz de riesgo mostrada en la tabla 4.

Tabla 3. Categorización de la frecuencia de ocurrencia del escenario

FRECUENCIA (evento/año)	CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN
$(10^{-1} <)$	A - Muy Frecuente	Ocurre una o más veces al año
$(10^{-1} - 10^{-2})$	B – Frecuente	Ocurre aproximadamente 1 vez en 25 años
$(10^{-2} - 10^{-3})$	C – Probable	Probablemente ocurra
$(10^{-3} - 10^{-4})$	D – Eventual	Quizá ocurra ocasionalmente
$(10^{-4} - 10^{-5})$	E – Inusual	No se espera que ocurra
$(10^{-5} >)$	F - Muy inusual	Ocurrencia teóricamente posible, pero técnicamente improbable

Con base en esta estimación se realiza la evaluación del riesgo con los siguientes criterios:

- **Riesgo inaceptable.** Se encuentra en un nivel no tolerable y por lo tanto requiere inmediata mitigación o estudio y valoración inmediata de posibles medidas de control para lograr márgenes de seguridad necesarios.
- **Riesgo moderado.** Aunque un riesgo moderado aparentemente se encuentra en un nivel aceptable, es necesaria la mitigación del accidente, sin embargo no tiene que ser inmediata.
- **Riesgo tolerable.** Es aceptable y requiere de juicio del administrador para determinar si se necesita futura mitigación, y analizar cuales medidas de reducción de bajo costo o fácil implementación son requeridas.

- **Riesgo insignificante.** En este nivel el riesgo es tan bajo que no requiere futuras acciones para tratar de mitigar las consecuencias, es decir, no requiere ningún tipo de estudio o análisis posterior

Tabla 4. Matriz de riesgo

		CATEGORIZACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS			
		I. BAJA	II. MEDIANA	III. ALTA	IV. CATASTRÓFICA
CATEGORIZACIÓN DE LA FRECUENCIA	A ($10^{-1} <$)	<i>IA</i>	<i>IIA</i>	<i>IIIA</i>	<i>IIVA</i>
	B ($10^{-1} - 10^{-2}$)	<i>IB</i>	<i>IIB</i>	<i>IIIB</i>	<i>IIVB</i>
	C ($10^{-2} - 10^{-3}$)	<i>IC</i>	<i>IIC</i>	<i>IIIC</i>	<i>IIVC</i>
	D ($10^{-3} - 10^{-4}$)	<i>ID</i>	<i>IID</i>	<i>IIID</i>	<i>IIVD</i>
	E ($10^{-4} - 10^{-5}$)	<i>ID</i>	<i>IID</i>	<i>IIID</i>	<i>IIVD</i>
	F ($10^{-5} >$)	<i>IF</i>	<i>IIF</i>	<i>IIIF</i>	<i>IIVF</i>

 Inaceptable	 Moderado	 Tolerante	 Insignificante
---	--	---	--

3. ESPECIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS

3.1 ESCENARIOS IDENTIFICADOS EN EL ALMACENAMIENTO DE LA GASOLINA EN GRANJAS DE TANQUES

El número asignado a los escenarios identificados en los siguientes ítems se conservará y utilizará para identificar cada uno de ellos a lo largo de todo el documento, sin necesidad de nombrar el escenario como tal.

3.1.1. Escenario 1. Sobrellenado de un tanque. Para este escenario se considera que se está realizando una operación de transferencia de gasolina hacia el tanque de almacenamiento mediante una tubería subterránea y por fallas en el sistema básico de control, el tanque se sobrellena. Este sistema básico de control incluye el medidor de nivel y la acción del operador. Durante el incidente debido a factores ajenos corriente arriba, el flujo de bombeo es alto, de 890 m³/h en promedio. Al sobrellenarse el tanque, la gasolina sale por los 8 venteos ubicados en el techo del tanque. Cada venteo tiene un área de 0,07 m². Se considera que el tanque no está rodeado por ninguna clase de dique.

3.1.2. Escenario 2. Ruptura de la línea de salida del tanque. Aunque la causa de esta ruptura puede ser debida a un error mecánico, de diseño, un error en el asentamiento del terreno, sabotaje o corrosión, para este caso en particular se asume la corrosión como la causa de la falla de esta tubería y se considera que el tanque estaba siendo llenado a una velocidad de flujo de aproximadamente 700 m³/h, y que la línea de salida tiene un diámetro aproximado de 15,24 cm (6 in). Adicionalmente, se considera que el tanque no está rodeado por el dique.

3.1.3. Escenario 3. Ruptura o desajuste cabal del brazo de carga de un camión cisterna. Este escenario ocurre durante una operación de carga de un camión cisterna con gasolina, y se desarrolla en la zona denominada “islas”, donde se llevan a cabo estas operaciones de carga de los camiones cisterna. El diámetro de este brazo se considera de 4 cm (2 in) aproximadamente, con una velocidad de flujo de 120 kg/s. Aunque con este flujo másico de escape no se supera la velocidad máxima de carga de los camiones para impedir la acumulación de cargas dentro de los límites aceptados, la cantidad de gasolina derramada es suficiente para generar un escenario peligroso.

3.1.4. Escenario 4. Agujero en la pared del tanque. La formación de un agujero puede ser debido a corrosión en las paredes del tanque, sobre todo en tanques muy antiguos o sin adecuado mantenimiento. Sin embargo, para este caso se considera que el agujero está hecho intencionalmente como acto de vandalismo, produciendo un escape de mayor cantidad. Para este escenario se considera que el agujero es de aproximadamente 10,16 cm (4 in) y está ubicado a 1,40 m del nivel del suelo. También se considera que en el momento del incidente el tanque estaba operando aproximadamente al 25% de su capacidad total. Para este incidente se considera que no existe ninguna clase de dique.

3.1.5. Escenarios 5. Ruptura catastrófica del tanque debido a un terremoto. Para este escenario se considera que el tanque se rompe catastrófica y todo el contenido es liberado bruscamente debido a la gran turbulencia en el momento de la ruptura. El tanque se rompe debido al esfuerzo al que son sometidos el cascarón y el techo, cuando ocurre un gran terremoto. También se pueden considerar factores tales como fallas mecánicas y metalúrgicas, los cuales facilitan el rompimiento del tanque en eventos externos como estos. Se considera la existencia de un dique, pero este no contiene la cantidad total derramada.

3.1.6. Escenario 6. Ruptura catastrófica del tanque debido al impacto de un carro-tanque. Para este escenario, al igual que el escenario 5, se considera que el tanque se rompe catastróficamente y todo el contenido es liberado bruscamente debido a la gran turbulencia en el momento de la ruptura, sin embargo en este caso, debido a que el rompimiento fue causado por el impacto de un carro-tanque, la ignición se considera inmediata. Se considera que el tanque esta rodeado por un dique, sin embargo este no contiene la cantidad total derramada.

3.2 CONTEXTO DONDE SE DESARROLLAN LOS ESCENARIOS

3.2.1. Descripción de la Granja de tanques y sus alrededores. En el anexo F. se muestra el mapa de la granja de tanques y los alrededores donde se determinó el desarrollo de los diferentes escenarios. El tanque seleccionado en el cual ocurren los escenarios se encuentra señalado con la letra T. Los otros tanques que hacen parte de la granja contienen también diversos líquidos inflamables y combustibles, tales como queroseno, diesel, fuel oil, entre otros. También, dentro de estas instalaciones se encuentran casas de bombeo, parqueaderos de carros, zonas de carga de camiones cisterna. Por otro lado, en la zona más cercana que rodea esta granja de tanques, se llevan a cabo diferentes actividades comerciales e industriales y se encuentran presentes edificios, negocios, y unas cuantas plantas de producción.

3.2.2. Condiciones y características del almacenamiento. En la tabla 5. se encuentran las condiciones y características del almacenamiento de la gasolina en la granja de tanques en el momento en que se considera que se desarrollan los escenarios

Tabla 5. Condiciones y características del almacenamiento en el momento de los incidentes

Tipo de tanque	Tanque de techo flotante interno
Material de construcción del tanque	Acero al carbón
Altura del tanque (m)	13
Diámetro del tanque (m)	32
Capacidad del tanque (m³)	10295
Temperatura de almacenamiento (°C)	20 - 29
Presión de almacenamiento (Pa)	101325
Ubicación dentro de la granja de tanques (m)	0 Oeste 135 Norte

4. RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA

4.1 DESARROLLO DE LOS ESCENARIOS DE LOS ACCIDENTES

4.1.1 **Eventos iniciantes y sus frecuencias de ocurrencia.** En la tabla 6. se muestran los diferentes eventos iniciantes con su respectiva frecuencia.

Tabla 6. Eventos iniciantes identificados y frecuencia de los mismos

ESCENARIO	EVENTO INICIANTE	FRECUENCIA DEL EVENTO INICIANTE (evento/año)
1	Sobrellenado del tanque debido a fallas en el sistema básico de control	$1 \cdot 10^0$ [2]
2	Ruptura de la línea de salida del tanque debido a corrosión	$1,16 \cdot 10^{-5}$ [3]
3	Ruptura cabal del brazo de carga del camión cisterna por tensión o esfuerzos anormales	$9,60 \cdot 10^{-2}$ [5]
4	Agujero en la pared del tanque por acto intencional	$1 \cdot 10^{-5}$ [6]
5	Rotura del tanque debido un terremoto	$1 \cdot 10^{-5}$ [2]
6	Rotura del tanque debido a el impacto de un carro-tanque	$1 \cdot 10^{-5}$ [2]

4.1.2. Severidad de las consecuencias de los escenarios

4.1.2.1. Distancias alcanzadas por los efectos de los eventos peligrosos.

Las condiciones climáticas escogidas para la realización de las diferentes corridas para los escenarios se escogieron con base tanto en las condiciones predominantes de la región, las cuales corresponden a una velocidad del viento de 4 m/s con una estabilidad atmosférica D, como a las condiciones más desfavorables por lo menos respecto a la dispersión, es decir, una velocidad de 1,5 m/s con una estabilidad atmosférica F, tal como es aconsejado por Louvar y Crowl [4]. En la tabla 7 se muestran estas condiciones junto con otras condiciones consideradas para la realización de las diferentes corridas. Además de las condiciones climáticas, se utilizaron los datos de la tabla 6., referentes al almacenamiento y los datos suministrados en la descripción de los escenarios (ver ítem 3.1)

Tabla 7. Condiciones utilizadas para las simulaciones

Condiciones	Corrida uno	Corrida dos
Velocidad del viento (m/s)	4	1,5
Dirección del viento	Oeste	Oeste
Clase de estabilidad atmosférica	D	F
Porcentaje de humedad relativa (%)	75	90
Temperatura del aire (°C)	29	20
Temperatura de la superficie del derrame (°C)	29	20

4.1.2.1.1. Alcances de la dispersión de la nube inflamable. Los resultados de las máximas dispersiones de la nube inflamable de la gasolina en la dirección

del viento se muestran en la tabla 8. Se observa que la dispersión se favorece alcanzando mayores distancias para una velocidad del viento de 1,5 m/s, con una estabilidad F (moderadamente estable). Al escenario 6 no se les realizó el análisis de la dispersión ya que por la naturaleza intrínseca del evento iniciante no permite la posibilidad de que haya formación de nube inflamable como tal, dado que la liberación de la gasolina es ocasionada por el impacto de un carro-tanque y la fuente de ignición se encuentra incluida en el mismo.

Tabla 8. Alcances de la nube de vapores inflamables de la gasolina

Escenario	Dispersión de la nube (m)					
	UFL (%v)		LFL (%v)		½ LFL(%v)	
	Estab. D 4 m/s	Estab. F 1,5 m/s	Estab. D 4 m/s	Estab. F 1,5 m/s	Estab. D 4 m/s	Estab. F 1,5 m/s
1	11,1	19,7	28,9	55,2	42,4	72,6
2	8,6	15,8	22,0	44,2	35,3	56,2
3	1,5	4,2	3,8	12,2	5,6	18,8
4	6,4	10,7	19,1	34,0	25,9	44,0
5	12,7	24,5	35,3	65,3	51,8	87,1
6	---	---	---	---	---	---

4.1.2.1.2. Alcances de la radiación de la piscina de fuego de la gasolina. En la tabla 9 se muestra el resultado de los máximos alcances de la radiación proveniente del incendio denominado piscina de fuego, considerando la ignición inmediata de la gasolina. Se puede observar un aumento en el alcance de la radiación, por parte de la piscina de fuego, en la dirección del viento cuando la estabilidad atmosférica es D y la velocidad del viento es 4 m/s para todos los escenarios, contrario a lo ocurrido para el caso de la dispersión de la nube inflamable, como se mencionó anteriormente. Este efecto puede ser debido a que un aumento en la velocidad del viento en la misma dirección produce una mayor inclinación de la llama. Sin embargo, se puede observar que esta variación no es muy grande debido a que la cantidad de radiación emitida por la piscina de fuego no depende de la estabilidad atmosférica.

4.1.2.1.3. Alcances de la sobrepresión de la explosión de la nube de vapor.

En la tabla 10. se muestran los resultados de los alcances de la sobrepresión proveniente de la explosión de la nube de vapor no confinada (UVCE) desde el epicentro de la misma. En las corridas de esta simulación solo se utilizaron las condiciones y parámetros para los cuales la nube de vapor inflamable se disperso más, es decir, los resultados son reportados solo para la velocidad de 1,5 m/s y una estabilidad atmosférica F.

Tabla 9. Alcances de la piscina de fuego de gasolina

Escenario	Alcances de la radiación (m)					
	31,00 kw/m ²		12,50 kw/m ²		4,00 kw/m ²	
	Estab. D 4 m/s	Estab. F 1,5 m/s	Estab. D 4 m/s	Estab. F 1,5 m/s	Estab. D 4 m/s	Estab. F 1,5 m/s
1	26,4	22,1	33,5	31,6	62,3	58,1
2	20,0	14,9	24,6	22,8	47,7	42,3
3	-----	-----	10,5	7,8	17,4	14,7
4	15,7	12,5	20,4	17,4	38,2	32,9
5	31,2	25,0	41,1	35,8	77,2	71,8
6	31,2	25,0	41,1	35,8	77,2	71,8

Tabla 10. Alcances de la explosión de la nube de vapor de gasolina

Escenario	Alcance de la sobrepresión (m)			
	350 mbar	160 mbar	100 mbar	50 mbar
1	50,4	87,0	124,3	161,8
2	39,5	65,4	97,0	124,6
3	---	---	---	---
4	---	38,9	53,5	71,6
5	95,7	168,8	245,4	309,3
6	---	---	---	---

Como puede observarse en la tabla 10. las máximas distancias alcanzadas para los valores de la sobrepresión son generados por el escenario 5, ya que como se mostró anteriormente, obtuvieron los mayores valores de la dispersión de la nube. También puede observarse que para el escenario 3 no se reportan datos para la explosión de la nube inflamable, debido a que no se alcanzan estas

sobrepresiones, sin embargo para tener una referencia, un valor de sobre presión de aproximadamente 3 mbar si se alcanzó a 30 m. Como ya se mencionó anteriormente, para el escenario 6 no se reportan resultados para la dispersión de la nube inflamable, por ende no se reportaron resultados para la explosión de la misma.

4.1.2.2. Perjuicios ocasionados. Los diferentes perjuicios ocasionados a las personas dentro y fuera de la granja de tanques, fueron estimados por los valores de la radiación de 31,00 y 12,50 kw/m², a las condiciones más desfavorables mencionadas anteriormente en el análisis de las distancias alcanzadas por la piscina de fuego, es decir, para los parámetros de la estabilidad atmosférica D a la velocidad de 4 m/s.

Para el caso de la explosión de la nube de vapor, los perjuicios fueron estimados por los valores de sobrepresión mostrados en la tabla 10, a las condiciones más desfavorables para la dispersión, es decir, para velocidad de 1,5 m/s y una estabilidad atmosférica F, referidas anteriormente en el análisis de las distancias a las que se dispersa la nube.

4.1.2.3. Categoría de las consecuencias. Finalmente, con base en los diferentes perjuicios ocasionados estimados anteriormente, y con los criterios mostrados en las tablas 2 y 3., se categorizaron las consecuencias para los diferentes escenarios, dependiendo de sí el resultado indeseado final es la piscina de fuego, o la explosión de la nube de vapor no confinada, según corresponda (ver tablas 11 y 12).

4.2. FRECUENCIA DE LOS ESCENARIOS

4.2.1. Salvaguardas consideradas como IPLs. Las salvaguardas consideradas, para cada escenario, fueron evaluadas para examinar si cumplían con los

requerimientos para ser consideradas IPLs (ver tabla 13), según los criterios descritos anteriormente (ver 2.2.1).

Tabla 11. Consecuencias sobre personal por la piscina de fuego y la explosión de la nube de vapor de la gasolina

ESCENARIO	CONSECUANCIA	
	PISCINA DE FUEGO	EXPLOSIÓN DE LA NUBE DE VAPOR
1	IV. Catastrófica	II. Mediana
2	III. Alta	I. Baja
3	I. Baja	I. Baja
4	II. Mediana	I. Baja
5	IV. Catastrófica	II. Mediana
6	IV. Catastrófica	---

Tabla 12. Consecuencias sobre la comunidad por la piscina de fuego y la explosión de la nube de vapor de la gasolina

ESCENARIO	CONSECUANCIA	
	PISCINA DE FUEGO	EXPLOSIÓN DE LA NUBE DE VAPOR
1	III. Alta	III. Alta
2	II. Mediana	III. Alta
3	I. Baja	II. Mediana
4	I. Baja	II. Mediana
5	IV. Catastrófica	III. Alta
6	IV. Catastrófica	---

Tabla 13. Salvaguardas consideradas IPLs

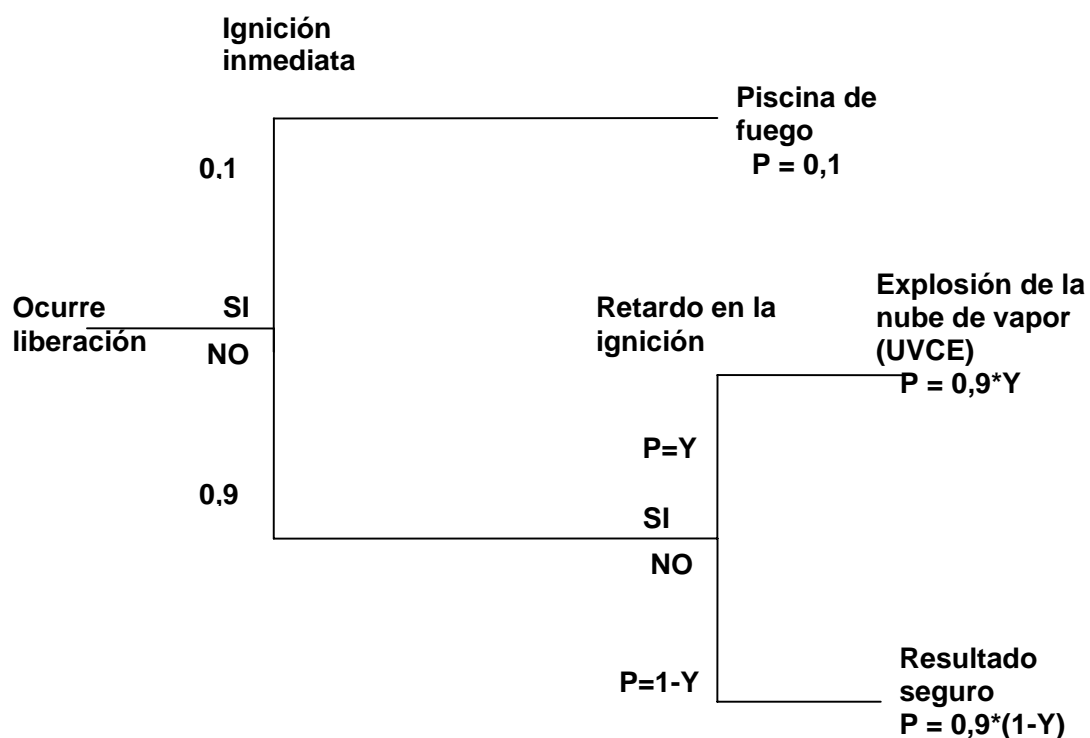
ESCENARIO	Salvaguardas candidatas a IPLs	Evaluación de las salvaguardas		Probabilidad de falla en demanda (PFD) de las IPLs
		Si	No	
1	Sistema shutdown		X	---
	Alarma de alto nivel	X		$1 \cdot 10^{-2}$
5	Dique		X	---
6	Dique		X	---

Como se puede observar en la tabla 13, tan solo una salvaguarda de todas las consideradas para los escenarios cumple con los requerimientos para ser IPL. Esto es para el escenario 1 en el cual la alarma de alto nivel es considerada como una capa independiente de protección, ya que esta es independiente del evento iniciante como tal, y se considera que también cumple con los requerimientos de tanto de efectividad como de auditoría. Sin embargo, el sistema shutdown no se consideró como capa independiente de protección debido a que no es independiente del evento iniciante, ya que, en el momento del incidente, el mismo medidor que falló se consideró que era el utilizado para activar este sistema.

Para los escenarios 5 y 6, el dique no se consideró como una IPL, ya que, se considera que este no cumple con los requerimientos, dado que, no es efectivo en prevenir las consecuencias indeseadas asociadas con estos escenarios y el volumen del mismo no tiene la adecuada capacidad para contener los escapes por la adición de nuevos tanques en el mismo área; y adicionalmente no es revisado adecuadamente para examinar y confirmar si es capaz de responder como debe ser ante una posible liberación del contenido del tanque.

4.2.2. Probabilidad de ignición. En la figura 5. se muestra el árbol de decisión base mediante el cual se hallaron estas probabilidades de ignición [1]. En la tabla 14. se muestran los datos necesarios de entrada para el árbol de decisión, junto con las respectivas probabilidades.

Figura 5. Árbol de decisión para la determinación de la probabilidad de ignición



- $Y=0,1$ si $\frac{1}{2}$ LFL se encuentra dentro de la granja de tanques
- $Y=0,5$ si $\frac{1}{2}$ LFL se encuentra en la zona industrial fuera de la granja de tanques

Tabla 14. Probabilidades de ignición para la piscina de fuego y la explosión de la nube de vapor

ESCENARIO	Zona alcanzada	Y	P piscina de fuego	P explosión de la nube de vapor no confinada	P dispersión
	½ LFL				
1	Industrial	0,5	0,1	0,45	0,45
2	Industrial	0,5	0,1	0,45	0,45
3	Granja de tanques	0,1	0,1	0,09	0,81
4	Industrial	0,5	0,1	0,45	0,45
5	Industrial	0,5	0,1	0,45	0,45
6	---	---	1,0	---	---

4.2.3. Categoría de la frecuencia del escenario. En la tabla 15 se muestran las frecuencias con la respectiva categoría de cada escenario para la piscina de fuego y la explosión de la nube de vapor no confinada. Esta categorización se realizó con base a la tabla 3. Como se puede observar, a pesar que el valor de la frecuencia de cada escenario es diferente para cada evento peligroso resultante la categoría es la misma, ya que son del mismo orden.

Tabla 15. Frecuencia de los escenarios

Escenario	Frecuencia de piscina de fuego (evento/año)	Frecuencia de explosión de vapor no confinada (evento/año)	Categoría
1	$1 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	C. Probable
2	$1,16 \cdot 10^{-6}$	$5,22 \cdot 10^{-6}$	F. Muy inusual
3	$9,6 \cdot 10^{-3}$	$8,64 \cdot 10^{-3}$	C. Probable
4	$1 \cdot 10^{-6}$	$4,5 \cdot 10^{-6}$	F. Muy inusual
5	$1 \cdot 10^{-6}$	$4,5 \cdot 10^{-6}$	F. Muy inusual
6	$1 \cdot 10^{-5}$	---	E. Inusual

4.3. Riesgo sobre el personal y la comunidad.

La estimación y evaluación del riesgo se realizó mediante el desarrollo de la matriz de riesgo mostrada en la tabla 4, y según los criterios descritos anteriormente (ver 2.3)

4.3.1. Riesgo de incendio (piscina de fuego) sobre el personal. En la tabla 16. se muestra el desarrollo de la matriz de riesgo teniendo en cuenta las consecuencias y las frecuencias (ver tablas 11 y 15., respectivamente)

Como puede observarse en la tabla 16. el escenario 1, correspondiente al sobrellenado del tanque, representa el mayor riesgo sobre el personal respecto al resto de los escenarios. A pesar que la frecuencia del escenario fue disminuida por la presencia de una alarma de alto nivel como una IPL, la consecuencia es catastrófica, haciendo que el riesgo de incendio sea MODERADO, y por lo tanto se requiere la realización de un estudio y análisis, dependiendo del interés particular de la organización, para determinar que capas de protección deben ser

adicionadas. Para este caso en particular, se sugiere la implementación de un dique que cumpla con las especificaciones de construcción y sea capaz de contener por lo menos el 110% del contenido del tanque más grande, según la norma NFPA 30 [10], o la instalación de un medidor de nivel independiente que active el sistema shutdown, para que de esta manera cumplan con las condiciones de una IPL.

Tabla 16. Matriz de riesgo de incendio sobre el personal

		CATEGORIZACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS			
		I	II	III	IV
CATEGORIZACIÓN DE LA FRECUENCIA	A	IA	IIA	IIIA	IIVA
	B	IB	IIB	IIIB	IIVB
	C	3	IIC	IIIC	1
	D	ID	IID	IIID	IVD
	E	IE	IIE	IIIE	6
	F	IF	4	2	5

Inaceptable
 Moderado
 Tolerante
 Insignificante

A pesar que los escenarios 5 y 6, tuvieron una consecuencia catastrófica, al igual que para el escenario 1, sus frecuencias de ocurrencia hace que sea raro que se presenten. Por lo tanto, estos dos escenarios, se encuentran en un nivel de riesgo TOLERABLE para el personal dentro de la granja de tanques, y el administrador de la misma, puede poner en tela de juicio la posibilidad de hacer un estudio para reducir aun más el riesgo a un nivel insignificante. Como sugerencia se propone la modificación del dique que rodea el tanque para que cumpla con los requerimientos necesarios, ya que, a pesar que esta salvaguarda estaba

implementada, no cumplió con los requerimientos para ser una IPL, como se había mencionado anteriormente (ver 4.3.1).

Por último, para el caso de los escenarios 2,3 y 4, el riesgo sobre el personal es INSIGNIFICANTE, lo que indica que no se requiere ningún tipo de inversión ni estudios para tratar de reducirlo.

4.3.2. Riesgo de incendio (piscina de fuego) sobre la comunidad. Se realizó teniendo en cuenta la severidad de las consecuencias mostradas en la tabla 12, y las frecuencias de ocurrencia mostradas en la tabla 15. mediante el desarrollo de la matriz de riesgo (ver tabla 17.)

Tabla 17. Matriz de riesgo de incendio sobre la comunidad

		CATEGORIZACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS			
		I	II	III	IV
CATEGORIZACIÓN DE LA FRECUENCIA	A	IA	IIA	IIIA	IVA
	B	IB	IIB	IIIB	IVB
	C	3	IIC	1	IVC
	D	ID	IID	IIID	IVD
	E	IE	IIE	IIIE	6
	F	4	2	IIIF	5

Inaceptable
 Moderado
 Tolerante
 Insignificante





Como se puede observar en la tabla 17. a pesar de que las consecuencias sobre la comunidad de los alrededores de la granja de tanques son en cierto grado menores que las consecuencias sobre el personal, el riesgo de incendio sobre la comunidad es el mismo que el riesgo que las personas corren dentro de la granja

de tanques (ver tabla 16.), lo que es alarmante y confirma la cercanía de ésta comunidad a las instalaciones. Por lo tanto, las sugerencias mencionadas anteriormente para tratar de disminuir el riesgo de incendio sobre el personal también pueden ser implementadas a este caso, sin embargo, el administrador de la granja de tanques se puede ver presionado por la comunidad u otras entidades regulatorias a disminuir los niveles del riesgo.

4.3.3. Riesgo de explosión (explosión de la nube de vapor no confinada) sobre el personal. El riesgo que representa para cada escenario la explosión de la nube de vapor no confinada, se realizó teniendo en cuenta la severidad de las consecuencias, mostradas en la tabla 11 y las frecuencias de ocurrencia mostradas en la tabla 15. En la tabla 18. se muestra el desarrollo de la matriz de riesgo.

Tabla 18. Matriz de riesgo de explosión sobre el personal.

		CATEGORIZACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS			
		I	II	III	IV
CATEGORIZACIÓN DE LA FRECUENCIA	A	IA	IIA	IIIA	IIVA
	B	IB	IIB	IIIB	IIVB
	C	3	1	IIIC	IIVC
	D	ID	IID	IIID	IIVD
	E	IE	IIE	IIIE	IIVE
	F	2-4	5	IIIF	IIVF

 Inaceptable	 Moderado	 Tolerante	 Insignificante
---	--	---	--

Como se puede observar en la tabla 18., en general, el nivel de riesgo que representa la explosión de vapor no confinada sobre el personal es bajo, ya que para todos los escenarios excepto para el escenario 1, el nivel del riesgo es INSIGNIFICANTE, por lo tanto no es necesario tomar ninguna clase de medida o estudio, ya que no se requiere adicionar ninguna clase de capa de protección.

Para el caso del escenario 1, dependiendo de los criterios de seguridad de la granja de tanques en particular se podría considerar realizar un estudio para disminuir aún más el riesgo.

4.3.4. Riesgo de explosión (explosión de la nube de vapor no confinada) sobre la comunidad. El riesgo que representa para cada escenario la explosión de la nube de vapor no confinada sobre la comunidad, se realizó teniendo en cuenta la severidad de las consecuencias mostradas en la tabla 12. y las frecuencias de ocurrencia mostradas en la tabla 15. En la tabla 19. se muestra el desarrollo de la matriz de riesgo.

Tabla 19. Matriz de riesgo de explosión sobre la comunidad

		CATEGORIZACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS			
		I	II	III	IV
CATEGORIZACIÓN DE LA FRECUENCIA	A	IA	IIA	IIIA	IIIA
	B	IB	IIB	IIIB	IIIB
	C	IC	3	1	IVC
	D	ID	IID	IIID	IVD
	E	IE	IIE	IIIE	IVE
	F	IF	4	2-5	IVF

 Inaceptable	 Moderado	 Tolerante	 Insignificante
---	--	---	--

Para los escenarios 2,4 y 5, el riesgo sobre la comunidad es INSIGNIFICANTE, a pesar que sus consecuencias no son bajas, sin embargo para los escenarios 3 y 1 el riesgo es TOLERABLE y MODERADO respectivamente. Por lo tanto, para el caso del escenario 3, queda a consideración de las entidades encargadas de la granja de tanques si es necesario realizar un estudio para tomar futuras medidas que lleven a disminuir este riesgo a INSIGNIFICANTE. Sin embargo para el escenario 1 si es necesario realizar un estudio de las posibles capas adicionales que se requieran implementar para disminuir el riesgo sobre la comunidad. Como sugerencias se recomiendan las mismas propuestas en el apartado 4.3.1. y adicionalmente se recomienda agregar una capa independiente de protección mitigativa tal como la construcción adecuada de paredes que contengan en cierto grado la sobre presión generada por la explosión.

CONCLUSIONES

- El Análisis de Capas de Protección (LOPA) es un método apropiado y eficaz para estimar y evaluar el riesgo en lo relacionado con el almacenamiento y manejo de la gasolina en granjas de tanques, dado que por su versatilidad es posible adaptar los criterios particulares de cada instalación, y por su metodología gráfica facilita el entendimiento para las personas interesadas en la seguridad de estas instalaciones.
- El riesgo de incendio fue igual tanto para el personal como para la comunidad; así mismo, el riesgo de la explosión de la nube de vapor no confinada fue mayor para la comunidad que para el personal debido a que el epicentro de la misma se encuentra en esta área, y es allí donde se presentan los mayores valores de sobrepresión generados por la explosión.
- El sobrellenado de un tanque atmosférico de techo flotante interno con gasolina es el escenario que representa mayor riesgo tanto de incendio como de explosión ya que sus consecuencias y frecuencias son relativamente altas.
- La adición de capas independientes de protección (IPLs) es una estrategia efectiva para prevenir o mitigar las consecuencias indeseadas en los incidentes relacionados con el almacenamiento de gasolina en granjas de tanques.

RECOMENDACIONES

- Es importante que los encargados de la seguridad en las granjas de tanques y en la industria petrolera en general se implemente el método de Análisis de Capas de Protección (LOPA) por ser un método flexible que permite la adaptación de las condiciones particulares de dichas instalaciones.
- Es de gran relevancia la evaluación de riesgos del almacenamiento de la gasolina en granjas de tanques sobre todo en instalaciones donde existe una comunidad tan cercana, dado que, el riesgo que corren esas comunidades es similar o peor al que corren las personas vinculadas a las instalaciones.
- Es importante que las salvaguardas utilizadas en el almacenamiento de gasolina en granjas de tanques cumplan con los requerimientos para ser consideradas capas independientes de protección (IPLs) y de esta forma puedan prevenir o mitigar las consecuencias indeseadas disminuyendo la frecuencia de los posibles incidentes.
- Sería interesante que la comunidad universitaria profundice en la investigación de estos métodos, poco conocidos en el medio, y que puedan abrir posibles campos de acción a los Ingenieros Químicos, respecto a la seguridad de procesos industriales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Center for Chemical Process Safety, Layer of Protection Analysis - Simplified Process Risk Assessment, Center for Chemical Process Safety/AIChE, 2001
- [2] Center for Chemical Process Safety, Guidelines For Chemical Process Quantitative Risk Analysis, second edition, Center for Chemical Process Safety/AIChE, New York, 2000
- [3] CHRISTENSEN, R.A. and R.F. Eilbert, 1989. Above Ground Storage Tank Survey, Entropy Limited, Lincoln Massachusetts, February, 1989.
- [4] CROWL, Daniel A. and LOUVAR, Joseph F., Chemical Process Safety Fundamentals with Applications Second Edition, Prentice Hall PTR, 2002, pg 194
- [5] Federal Emergency Management Agency, U.S. Department of Transportation, U.S. Environmental Protective Agency, Handbook for Chemical Hazard Analysis Procedures, Washington, D.C. 1989
- [6] LEES, F.P., Loss Prevention in the Process Industries (2nd Edition), Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 1996
- [7] MARKOWSKI, Adam S., exLOPA For Explosion Risks Assessment, 8th Annual Symposium, Mary Kay O'Connor Process Safety Center "Beyond Regulatory Compliance: Making Safety Second Nature", October 2005
- [8] Mary Kay O'connor Process Safety Center, Practical Risk Reduction in the Petroleum Industry, Texas, USA, Mayo 2006
- [9] MYERS, Philip E., Aboveground storage tanks, 1997, pg 331
- [10] National Fire Protection Association (NFPA), NFPA 30: Flammable & Combustible Liquids Code, 2000
- [11] POWELL Taf, The Buncefield Investigation second Progress report, 2006
- [12] POWELL Taf, Buncefield Major Incident Investigation, 2006

ANEXO A. Incidentes ocurridos con líquidos inflamables

Incidente en el depósito de Buncefield (2005)

En diciembre 11 de 2005 en el depósito de almacenamiento de Buncefield ocurrió una explosión masiva. Posteriormente, otras leves explosiones ocurrieron por un gran fuego que envolvió 20 grandes tanques. El fuego ardió por varios días; 250000 litros de espuma concentrada junto con 25 millones de litros de agua fueron usados por los bomberos para extinguir el fuego. Como resultado de la explosiones y del fuego, cerca de 12000 millones de galones de gasolina, diesel y combustible de aviación se perdieron. Hubo 43 heridos y daños estructurales no solo en la instalaciones sino también en los alrededores debido a la sobrepresión de la explosión. El ambiente se afectó significativamente debido a la polución y también por la grande capa negra de humo que surgió por el fuego.

El evento iniciante que encabezó las explosiones y el fuego fue el sobrellenado de un gran tanque sobre tierra conteniendo gasolina. Se cree que la nube de vapor inflamable encontró una fuente de ignición de algún equipo de bombeo cercano. Es interesante como la nube de vapor era visible a los ojos de los testigos minutos antes que ocurriera el incidente. Las condiciones climáticas (alta humedad) proporcionaron óptimas condiciones para el desarrollo de la nube de vapor inflamable.

Incidente en Netherlands (1968)

El incidente de Netherlands es el más catastrófico con 80 tanques quemados como resultado de una serie de explosiones seguidas por incendios. Una gran cantidad de ventanas se partieron durante la onda de explosión. El proyectil de fragmentos causó 2 muertos y 85 heridos. Esta devastadora explosión de nube

de vapor ocurrió durante la evaporación y seguidamente la formación de una nube de hidrocarburos ligeros de una emulsión compuesta por petróleo y agua caliente. Esta emulsión fue calentada y una masiva ebullición ocurrió. Los hidrocarburos ligeros fueron liberados a través de venteos del tanque resultando en el sobrellenado de dos fases. Aunque la fuente de ignición es desconocida, el daño causado por la explosión fue extenso.

Incidente en New Jersey (1983)

El incidente causo 1 muerto y 24 heridos, destruyó 4 tanques de gasolina y liberó 3 millones de galones de valiosa gasolina. El incidente ocurrió cuando uno de los 3 tanques en el área del dique fue sobrellenado. Este tanque fue llenado desde una tubería subterránea y simultáneamente parte de la gasolina que contenida fue transferida a otro tanque remoto. Una nube de vapor se formo como resultado de la evaporación de los componentes ligeros de la gasolina, los cuales entraron en ignición probablemente por un incinerador cercano. Hubo algunas explosiones iniciales menores seguidas de una gran explosión con una llama grande de fuego que duro quemándose 48 horas.

Incidente en Denver (1991)

Este incidente ocurrió en el aeropuerto de Denver como resultado de una cadena de eventos. El incidente fue el resultado de gasolina ardiendo rociada sobre dos tanques proveniente del equipo de bombeo en un área adyacente de contención, compuesta por tuberías, válvulas, bombas y un cuarto de control. Después, el fuego envolvió 4 tanques adyacentes y ardió durante 48 horas, donde 3 millones de galones de Jet 1. Afortunadamente no hubo fatalidades o heridos en este caso.

Incidente en Puerto Llano

El incidente fue el resultado de una explosión que se produjo a las 8.15 h. en un tanque de almacenamiento de gasolina refinada de la unidad 100 del área de Refinería y Conversión. El incendio se avivó sobre las dos y media de la tarde, tras otra serie de explosiones que obligó incluso a evacuar la planta. En la zona se elevó una gran columna de humo, pero no hay peligro de nube tóxica. Este incidente dejó 4 muertos y 7 heridos de gravedad.

Incidente en Oklahoma

La explosión y el fuego del tanque de almacenamiento se dieron debido a una ignición por una mezcla de los vapores de combustible inflamable y aire, con una descarga estática eléctrica debido a un manejo inapropiado de la compañía ConocoPhillips cuando se conducía las operaciones de los tanques. El reporte de seguridad concluyó que la alta velocidad del diesel en la tubería de llenado del tanque y la turbulencia creada resultó en la generación de un incremento de la carga estática. En este incidente se perdieron cerca de 80000 barriles de diesel.

Incidente de San Juan

Este incidente ocurrió en México, en la Planta de PEMEX. Un tanque de combustible estalló, de los 3 que ardieron, y a pesar del trabajo de los bomberos y los cuerpos de seguridad, ardieron durante 35 horas. El gran incendio consumió dos tanques que contenían más de 100 mil barriles de gasolina. El saldo es de cuatro muertos y varios heridos, entre intoxicados y quemados. En esta ocasión, 34 millones de litros de gasolina almacenados en la planta Satélite Norte de PEMEX ardieron hasta la madrugada. La explosión inicial se escuchó en por lo menos ocho barrios cercanos al lugar.

ANEXO B. Propiedades de la gasolina

Tabla A1. Propiedades de la Gasolina

Punto de inflamación (flash point) (°C)	-43
Punto de ebullición (°C)	70 - 200
LFL y UFL (%v)	1,1 – 7,6
Temperatura de autoignición (°C)	220
Presión de vapor (kPa)	40 - 65
Peso molecular	86,88 – 115,84
Gravedad específica	0,71-0,77
Densidad del líquido (Kg/m³)	680
Densidad del vapor (Kg/m³)	3,9 – 4,81

ANEXO C. Peligros asociados a la gasolina

Piscina de fuego (pool fire)

Cuando se derrama un líquido inflamable, tal como la gasolina, existe la posibilidad de que al encontrar una fuente de ignición muy próxima al punto de fuga se produzca un incendio inmediatamente. El incendio puede ser de grandes proporciones dependiendo de la cantidad fugada, provocando llamas perjudiciales para la integridad no solo de los equipos envueltos por estas, si no también para las personas ubicadas en el área próxima, y un flujo de calor radiante perjudicial hasta distancias apreciables de las mismas. La radiación máxima emitida por un incendio de gasolina se encuentra en un rango de 70 a 110 kw/m². También se produce una gran cantidad de humo contaminante en gran parte para el ambiente.

El diámetro de la piscina dependerá de la cantidad derramada, en caso de que el líquido haya quedado retenido en el tanque como tal, este diámetro será directamente el diámetro del tanque, o en caso de quedar retenido en el dique rectangular, se obtendrá un diámetro circular equivalente. Es decir, gracias al dique las dimensiones del incendio se reducen considerablemente, ya que este disminuye el tamaño de la piscina de fuego.

Explosione de vapor no confinada (UVCE)

Una UVCE ocurre cuando después de un derramen de gasolina, esta no encuentra un punto de ignición inmediato si no que hay un retardo en la ignición, lo que hace que la nube de vapor se disperse largas o cortas distancias dependiendo de las condiciones meteorológicas, de hecho la gasolina tiene una presión de vapor tal que facilita la evaporación de los componentes mas volátiles de la misma.

Para que se produzca una explosión de una nube inflamable se deben dar circunstancias tales como cantidad determinada de vapor entre los límites de inflamabilidad, presencia de una fuente de ignición y grado mínimo de confinamiento. Por lo tanto, si no existe el suficiente grado de confinamiento, en lugar de una explosión se producirá una llamarada.

El principal efecto de este evento peligroso es la onda de sobrepresión proveniente de la explosión, esta ocasiona los daños a estructuras y equipos, y perjuicios a las personas dependiendo del grado de la misma.

Explosión confinada de la nube de vapor (CVCE)

Cuando hay obstáculos suficientes como para frenar, por obstrucción, la expansión de los vapores inflamables que arden, puede producirse una explosión confinada (UVCE), produciéndose el fenómeno denominado acumulación de presión y alcanzándose sobre presiones sensiblemente mayores que en el caso de deflagración no confinada.

Una explosión confinada puede ocurrir en el interior de un edificio, cuarto o tanque. Después de este accidente, es muy probable que el tanque se incendie, e incluso se rompa, derramándose su contenido. El estallido da origen a una onda de presión y a proyectiles primarios constituidos por los fragmentos del depósito destruido.

Borbotón (Boilover)

Se produce en la combustión de inflamables o combustibles en un recipiente abierto. Se caracteriza por un aumento súbito de la intensidad del fuego seguido de la expulsión del producto incendiado fuera del recipiente después de un largo período de combustión lenta que hacía pensar que la situación estaba controlada.

El fenómeno "Boilover" se genera como consecuencia de que los residuos de combustión superficial se vuelven más pesados y se van hundiendo formando una capa caliente (onda calorífica) descendiente, bajando más rápidamente que la recuperación de la superficie del líquido. Cuando en el fondo del depósito existe una capa de agua (caso frecuente, tanto si se ha previsto de esta manera para el almacenaje sobre "cama húmeda", como porque sea agua procedente de lluvia y condensaciones que ha decantado en el fondo), que se va calentando. Si la temperatura que adquiere el agua llega a ser tal que inicie la ebullición, se vaporizará y en expansionarse estos vapores proyectarán hacia el exterior del depósito gran parte de la masa líquida, que se extiende encendida alrededor del depósito.

Llamarada (FLASH-FIRE)

Esta clase de incendio ocurre cuando después de ocurrir el escape líquido inflamables hay un retardo en la ignición y de esta forma la nube de vapor se va a dispersar dependiendo de las condiciones meteorológicas, pero debido a que no existe el suficiente grado de confinamiento, no se produce una explosión no confinada si no que se produce una llama progresiva de difusión o premezclada con baja velocidad de llama y no se produce onda de presión si no que los efectos serán resultado exclusivo de la radiación emitida por la llamarada. Es muy peligrosa, ya que si la nube de vapor alcanza largas distancias puede quemar en un tiempo muy corto los objetivos que encuentra a su paso, incluyendo personas, estructuras o edificaciones, en un largo relativamente corto de tiempo.

ANEXO D. CANARY by Quest®

En la figura D1 se muestra la interfaz gráfica del software CANARY mediante la cual es posible escoger los diferentes eventos peligrosos según corresponda.

Figura D1. Interfaz del usuario del software CANARY

The screenshot shows the 'Title Screen' of the CANARY software. It features a blue title bar with the text 'Title Screen' and a close button. The main window area is light beige and contains the following elements:

- Project Directory:** \usr\canary\results\
- Case Title:** Gasoline VCE
- Case Name:** martha2
- User ID:** 1
- Project Number:** 1
- Case Type:** A group of radio buttons with the following options:
 - Vapor Dispersion/VCE
 - Explosions
 - Pool Fire
 - Flare/Torch Fire
 - Fireball (BLEVE)
- Units:** A group of radio buttons with the following options:
 - Metric
 - English
- Buttons:** 'Cancel' and 'Next ->'

A continuación se muestran las graficas características de un reporte de la dispersión de la nube inflamable de vapor de la gasolina, de la piscina de fuego de la gasolina derramada y de la explosión de la nube de vapor no confinada de los vapores de la gasolina, obtenidos de este software. Las figuras D1, D2 y D3 son representativas de todos los escenarios desarrollados.

Figura D2. Dispersión de la nube de vapor de gasolina a una velocidad del viento de 1,5 m/s y una estabilidad atmosférica F para las concentraciones UFL, LFL y ½ LFL % mol

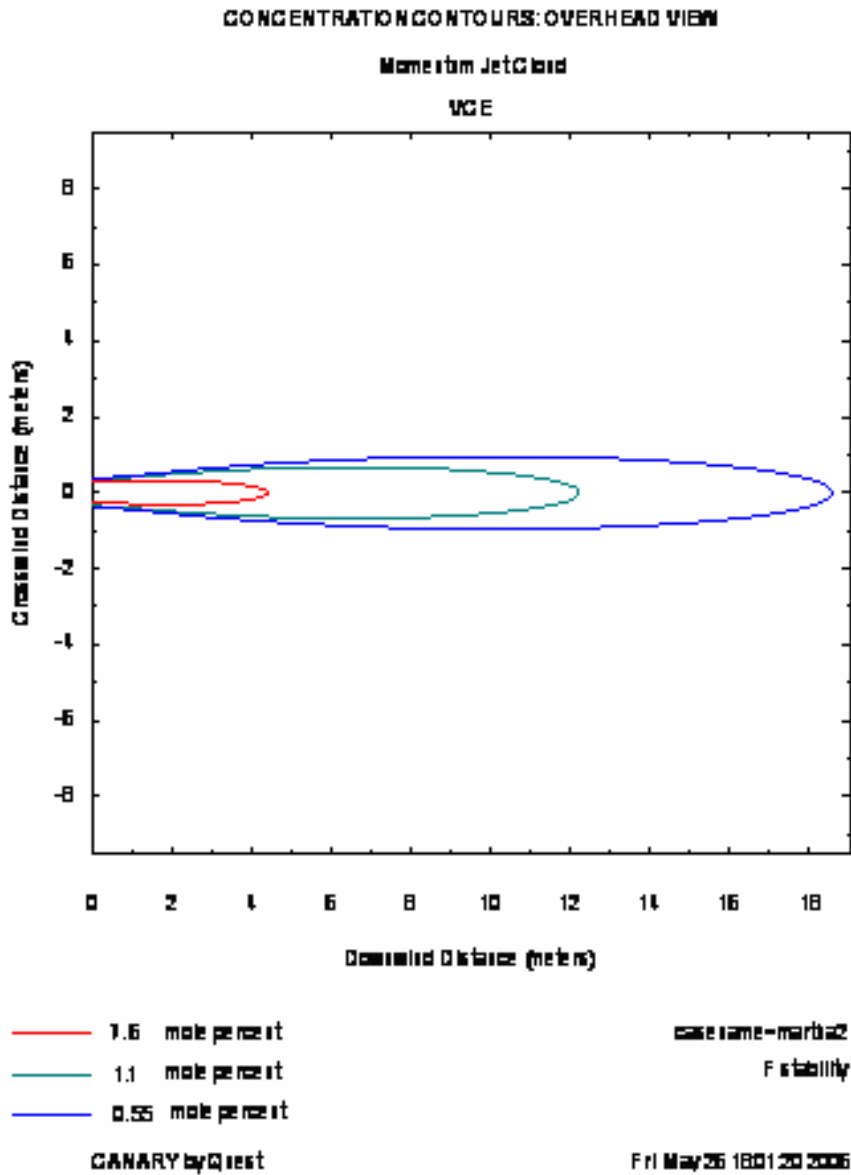


Figura D3. Radiación de la piscina de fuego de gasolina a una velocidad del viento de 4 m/s y una estabilidad atmosférica D para valores de 12,5 kw/m² y 4kw/m²

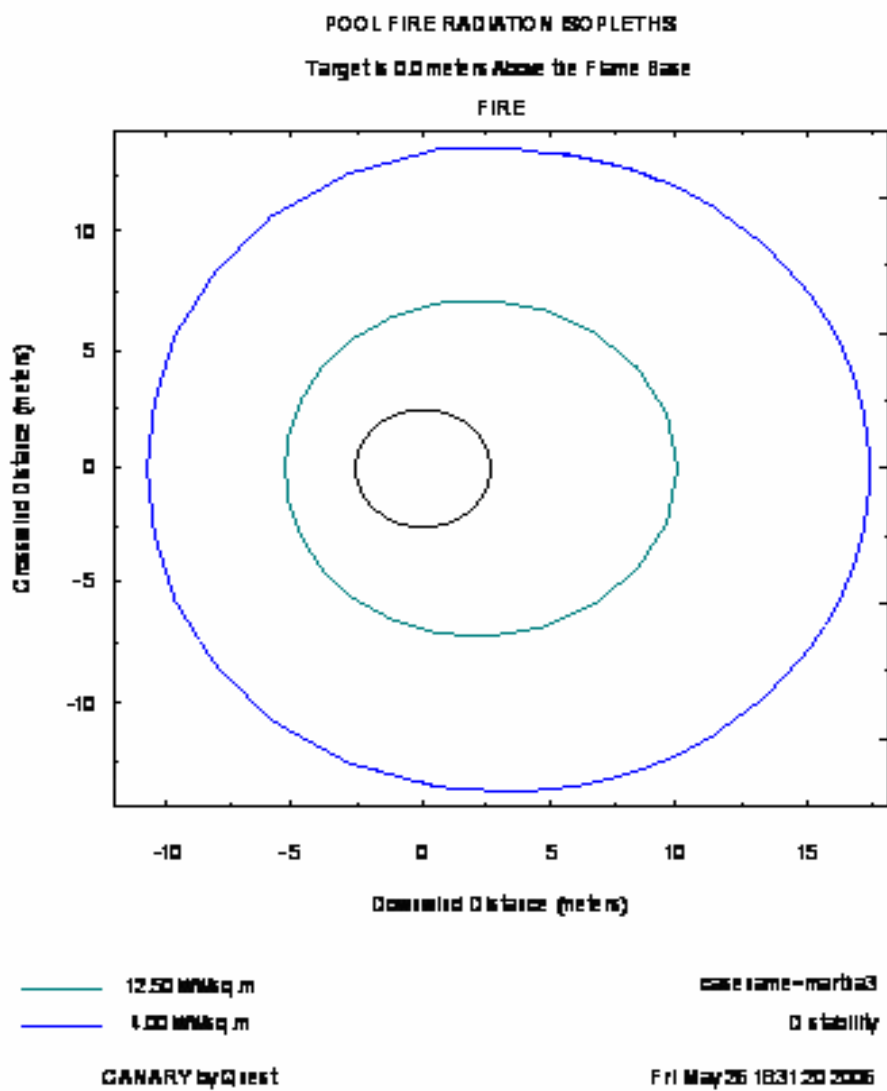
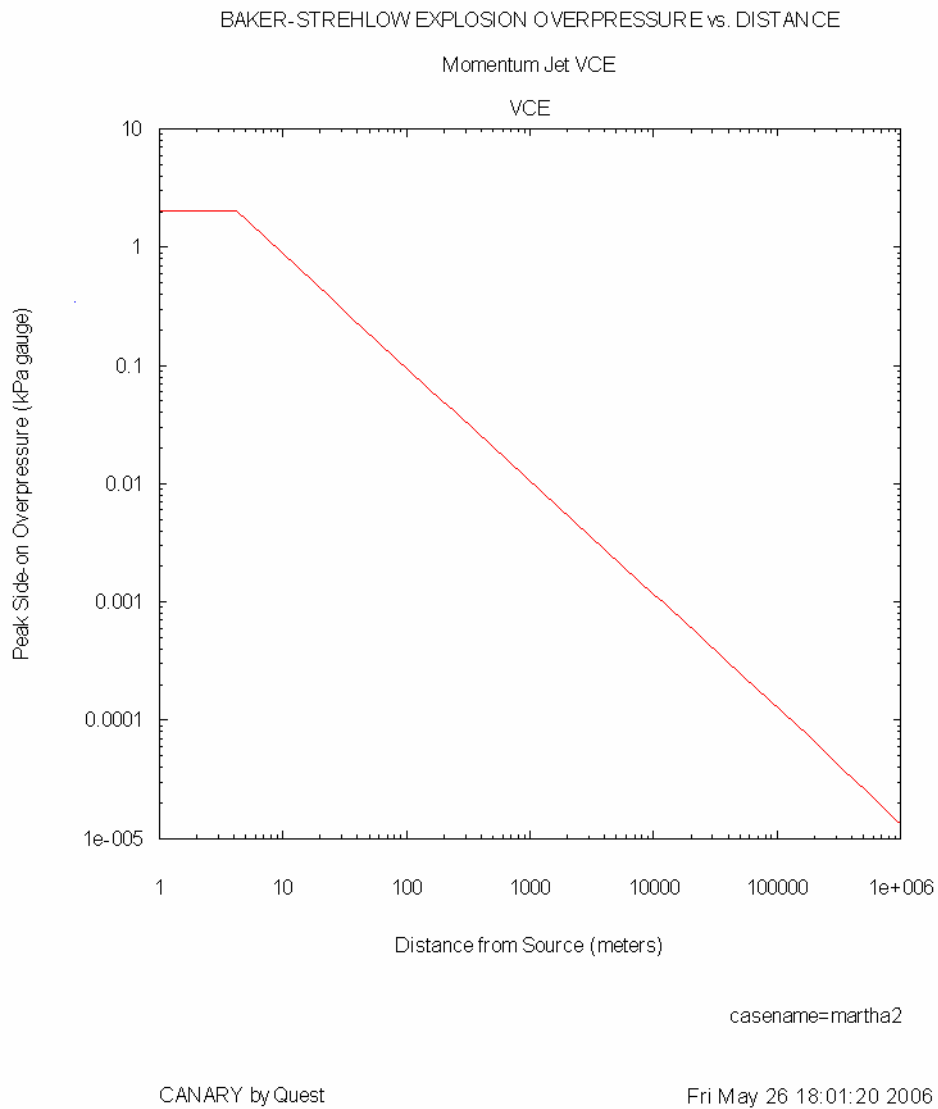


Figura D4. Sobrepresión de la explosión no confinada de la nube de vapor de gasolina a una velocidad del viento de 1,5 m/s y una estabilidad atmosférica F desde el epicentro de la misma.



ANEXO E. Efectos de los eventos peligrosos

Tabla E1. Efectos de la radiación proveniente de un incendio

Kw/m ²	EFECTOS DE LA RADIACION CALÓRICA INCIDENTE	
	Daños a equipos / materiales	Daños a personas
400	Máxima radiación tolerable por una pared de ladrillos	
200	Debilitamiento del hormigón armado	
60	Máxima radiación tolerable por el cemento	
40	Máximo tolerable por el acero estructural y el hormigón prensado. Destrucción de equipos y tanques	
37.5	Suficiente para causar daños a equipos de proceso; colapso de estructuras	100% de mortalidad en 1 minuto.
25	El acero delgado, aislado, puede perder su integridad mecánica. Energía mínima para encender madera, por larga exposición, sin llama	1% de mortalidad en 1 minuto. Lesiones significativas en 10 seg.
12.5	Energía mínima para encender madera después de una larga exposición, con llama Ignición de tubos y recubrimientos de plástico en cables eléctricos. daños severos a equipos de instrumentación	ZONA DE INTERVENCIÓN: Máximo soportable protegido con trajes especiales, por tiempo limitado (ejemplo bomberos). Es más que conveniente, de todos modos, refrigerar a la persona expuesta a esta dosis. Sin trajes especiales, 1% de mortalidad en 1 minuto, quemaduras de 1er grado en 10 seg.
11.7	El acero delgado, parcialmente aislado, puede perder su integridad mecánica	
8		Umbral de letalidad (1% de afectación) por incendio, para un tiempo de exposición de 1min.
4		ZONA DE ALERTA: Suficiente para causar dolor si la exposición es mayor de 20 seg. Quemadura de 1er grado. Improbable formación de ampollas.
1.5		Máximo soportable por personas con vestimentas normales y un tiempo prolongado

Tabla E2. Efectos de la sobre presión proveniente de la onda explosiva

Sobrepresión (mbar)	Tipo de daño
2	Ruta ocasional de cristales grandes sometidos a tensiones.
2,75	Ruido fuerte. Rotura de cristales por onda sonora.
7	Rotura ocasional de cristales pequeños sometidos a presión.
20	Límite inferior de lanzamiento de proyectiles. 95% de probabilidad de no sufrir daños importantes. Daños menores en techos de casas. Rotura del 10 % de los cristales.
34-69	Rotura del 90% de los cristales. Destrucción de las ventanas, con daños en los marcos.
50	Daños estructurales menores en las casas. Umbral de zona de alerta en accidentes mayores.
69	Demolición parcial de casas, que quedan inhabitables.
69-138	Fallo de paneles y mamparas de madera, aluminio, etc. Rotura de planchas de amianto ondulado.
125	Umbral de la zona de intervención de accidentes mayores.
138	Colapso parcial de paredes y techos de edificios.
138-207	Destrucción de muros de hormigón (no armado) de 20/30 cm de grosor. Daños estructurales importantes.
165	Umbral (1%) de rotura de tímpano.
172	Destrucción del 50% de las obras de ladrillo de los edificios. Deformación de estructuras de acero.
207-276	Colapso de estructuras metálicas. Rotura de tanques de almacenamiento.
344-480	Rotura de postes de madera de servicios públicos. Destrucción, prácticamente completa, de casas.
480	Vuelco de vagones de ferrocarril cargados.
480-550	Rotura de muros de ladrillo de 20/30 cm de grosor.
700	Probable destrucción total de edificios. Máquinas pesadas (>3.500 kg) desplazadas y gravemente dañadas.
840	90% de probabilidad de rotura de tímpano.
990	Umbral (1%) de muerte por hemorragia pulmonar.
1760	90% de probabilidad de muerte por hemorragia pulmonar.
19300	Formación de cráter.

Tabla E3. Perjuicios directos a las personas provenientes de la sobrepresión de la onda explosiva

Pressure (psi)	Pressure (millibar)	Direct harm to people
2	138	Threshold for eardrum rupture
1.5-2.9	103-200	People knocked down or thrown to the ground
10-15	690-1035	90% probability of eardrum rupture
12-15	830-1035	Threshold of lung haemorrhage
30-34	2068-2400	Near 100% fatality from lung haemorrhage

ANEXO F. Mapa de la granja de tanques donde se desarrollan los incidentes

