

**ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGO (QRA) Y DE
SEGURIDAD EN LA INFRAESTRUCTURA DEL GAS
NATURAL LICUADO (LNG) ENFOCADO A LA SEGURIDAD
EN LOS TERMINALES**

JULIAN CAMILO FERREIRA BALLESTEROS

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

2006

**ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGO (QRA) Y DE
SEGURIDAD EN LA INFRAESTRUCTURA DEL GAS
NATURAL LICUADO (LNG) ENFOCADO A LA SEGURIDAD
EN LOS TERMINALES**

JULIAN CAMILO FERREIRA BALLESTEROS

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

Director:

M. SAM MANNAN, PhD, PE, CSP

Revisor:

LEONARDO ACEVEDO DUARTE, PhD

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

2006

A DIOS por ser mi guía y colmarme de bendiciones...

A mi madre por todo su amor y apoyo...

A mi padre por su amor y ejemplo...

A mi familia por ser la razón de todos mis esfuerzos...

A Carmen Helena por su constante apoyo y compañía.

AGRADECIMIENTOS

Mis sinceros agradecimientos:

Al Doctor M. Sam Mannan, director del proyecto y director del MKOPSC, por permitirme formar parte de su grupo de investigación y por su acertada orientación en el desarrollo del presente proyecto.

Al Doctor Álvaro Ramírez García, director de escuela de ingeniería química, por su permanente apoyo y ayuda.

Al Doctor Kenneth Hall, director de escuela de ingeniería química Universidad Texas A&M, por brindarme la oportunidad de realizar este trabajo.

A todos los miembros del grupo de investigación MKOPSC, por su colaboración en la realización del proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	
1 CONCEPTOS TEÓRICOS	4
1.1 PROCESO DEL GAS NATURAL LICUADO (LNG)	5
1.2 ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGO (QRA)	6
1.3 ÁRBOLES DE SUCESOS (EVENT TREES)	7
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	8
2.1 IDENTIFICACIÓN DE ESCENARIOS	10
2.2 METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LAS VARIABLES EN LA DISPERSIÓN DEL LNG	11
2.3 METODOLOGÍA PARA ESTIMACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE LOS INCIDENTES	11
2.4 METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CONSECUENCIA DE CADA INCIDENTE	13
2.5 PARÁMETROS PARA LA DETERMINACIÓN DEL RIESGO	13
2.5.1 Riesgo Humano	14
2.5.2 Riesgo Ambiental	15
2.5.3 Riesgo de Pérdidas Económicas	16
2.5.4 Riesgo de pérdida de imagen	16

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	18
3.1 ANÁLISIS DE LAS VARIABLES QUE INFLUYEN EN LA DISPERSIÓN Y EXPLOSIÓN DEL LNG	18
3.2 ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS	24
3.3 ANÁLISIS DE LA PROBABILIDAD DE LOS EVENTOS IDENTIFICADOS	27
3.4 CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO	30
3.4.1. Cuantificación del riesgo de pérdidas humanas	30
3.4.2. Cuantificación del riesgo ambiental.	31
3.4.3. Cuantificación del riesgo de pérdidas económicas	32
3.4.4. Cuantificación del riesgo de pérdida de imagen	33
4. CONCLUSIONES	34
5. RECOMENDACIONES	35
BIBLIOGRAFÍA	36
ANEXOS	37

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Propiedades del gas natural licuado	4
Tabla 2. Clasificación de la frecuencia	12
Tabla 3. Cuantificación de afectación a personas	15
Tabla 4. Cuantificación de contaminación ambiental	15
Tabla 5. Cuantificación de pérdidas económicas	16
Tabla 6. Cuantificación de pérdida de imagen	16
Tabla 7. Matriz para la evaluación del riesgo	17
Tabla 8. Descripción de los escenarios utilizados para el análisis de las variables de dispersión y explosión del LNG	18
Tabla 9. Resultados de las simulaciones usando PHAST®	20
Tabla 10. Resultados de la simulación de la dispersión de LNG para los escenarios 7 al 11 usando Degadis y Canary	24
Tabla 11. Resultados de la simulación de una piscina de fuego para los escenarios 7 al 11 usando LNGFIRE3 y Canary.	27
Tabla 12. Probabilidad de ocurrencia anual para los escenarios 7 al 11	29
Tabla 13. Matriz de riesgo de pérdidas humanas	30
Tabla 14. Matriz de riesgo Ambiental	31
Tabla 15. Matriz de riesgo de pérdidas económicas	32
Tabla 16. Matriz de riesgo de pérdida de imagen	33

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema general de una planta de regasificación de LNG.	5
Figura 2. Procedimiento para el análisis cuantitativo de riesgo.	9
Figura 3. Dispersión en la dirección del viento para un agujero de diámetros 0.08m, 1.38m y 2.76m y condiciones climatológicas: velocidad del viento 2.5m/s, estabilidad atmosférica A/C/F para concentración de 22,000ppm	23
Figura 4. Escenario 7 – Árbol de eventos para una fuga sin mitigar	28

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Descripción detallada de los escenarios identificados	37
ANEXO B. Peligros asociados al LNG	40
ANEXO C. Una pequeña historia de los incidentes con LNG	45
ANEXO D. Regulación del LNG	48
ANEXO E. Frecuencias estimadas para cada escenario	49
ANEXO F. Comparación de los software utilizados en el análisis de consecuencias (Canary y Degadis)	54
ANEXO G. Resultados de las simulaciones utilizando PHAST®	55
ANEXO H. Software utilizado para el análisis de consecuencias	60

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGO (QRA) Y DE SEGURIDAD EN LA INFRAESTRUCTURA DEL GAS NATURAL LICUADO (LNG) ENFOCADO A LA SEGURIDAD EN LOS TERMINALES*

AUTORES: Julian Camilo Ferreira Ballesteros**

PALABRAS CLAVES: Gas natural licuado, Riesgo, Seguridad de procesos.

DESCRIPCIÓN:

Debido a la potencial área de impacto de una fuga no planeada de gas natural licuado (LNG) y el incremento en la demanda de este, un análisis cuantitativo de riesgo es requerido, así como también un análisis de las consecuencias de una fuga intencional o accidental de gas natural licuado.

Los escenarios simulados fueron determinados mediante la combinación de accidentes previos y un análisis de ingeniería. Una vez los escenarios fueron establecidos, la radiación térmica y el comportamiento de la nube de vapor, resultantes de la fuga de LNG, fueron determinados usando simuladores para la estimación de consecuencias, considerando variables tales como: tiempo de la fuga, localización y orientación de la fuga, tipo de superficie sobre la cual el LNG se derrama, temperatura, condiciones ambientales existentes al momento de la fuga y la geometría de la fuga. También para cada escenario, se construyó un árbol de eventos en un esfuerzo para determinar la frecuencia de ocurrencia.

A partir de los resultados de las simulaciones y el cálculo probabilístico, se construyeron matrices para el cálculo final de riesgo, para de esta manera obtener una medida de las pérdidas humanas, económicas y ambientales en términos de la probabilidad del incidente y la magnitud de la pérdida.

Estas matrices de riesgo proveen al director de la planta con una herramienta que la ayuda a evaluar el riesgo total de un proceso así como también para proponer estrategias que reduzcan el nivel de riesgo.

* Trabajo de investigación.

** Facultad de Ingenierías Físico Químicas, Escuela de Ingeniería Química, Director M. Sam Mannan, Ph.D.

ABSTRACT

TITLE: SAFETY AND QUANTITATIVE RISK ANALYSIS FOR LIQUEFIED NATURAL GAS INFRASTRUCTURE FOCUSED ON THE SAFETY IN THE TERMINAL *

AUTHORS: Julian Camilo Ferreira Ballesteros **

KEY WORDS: Liquefied natural gas, Risk, Process safety.

DESCRIPTION:

Due to the potential wide area impact of an unplanned Liquefied Natural Gas (LNG) release and the increasing on the demand of LNG, a quantitative risk assessment is required, as well as an accident consequence analysis from accidental or intentional LNG spill.

Simulation scenarios were determined by the combination of past history of releases from LNG facilities and engineering analysis. Once the scenario was established, the heat radiation and vapor cloud behavior, resultant from a LNG leak, was determined using consequence estimation simulators, considering variables such as release time, location and orientation of the release, type of surface over which the LNG spreads, temperature, environmental conditions existing at the time of the release and geometry of the leak. Also for each release scenario, an event tree was created in an effort to determine the frequency of occurrence.

From the results of the simulation and the probabilistic assessment, final risk assessment matrices were made in order to get a measure of human injury, environmental damage, or economic loss in terms of both the incident likelihood and the magnitude of the loss of injury. These risk matrices provide managers with a tool to help them evaluate the overall risk of a process and to propose a strategy to reduce the risk level.

* Research work.

** Faculty of physical chemistry engineering, School of chemical engineering, Project Director M. Sam Mannan, Ph.D.

INTRODUCCIÓN

La proliferación de instalaciones industriales y el transporte de sustancias peligrosas han implicado la aparición de nuevos riesgos que pueden llegar a ocasionar un fuerte impacto sobre la planta y su entorno; entonces se hace urgente la necesidad de reducir los riesgos a niveles tolerables, que a su vez sean compatibles con el desarrollo sostenible actualmente perseguido.

La palabra “Seguridad” se usaba antiguamente como una estrategia para prevenir accidentes mediante el uso de cascos, botas, y una variedad de reglas y regulaciones. El énfasis estaba en la seguridad de los trabajadores. Recientemente, “Seguridad (safety)” ha sido reemplazada por “Prevención de daños (pérdidas) (loss prevention)”. Este término incluye identificación de peligros, evaluación técnica, y el diseño de nuevas características en los procesos para prevenir pérdidas.

El desarrollo tecnológico experimentado por los países industrializados ha llevado consigo una notable mejora en el nivel de vida. Sin embargo, para mantener tales demandas energéticas se ha hecho necesario el uso de diversas fuentes de energía, una muy importante de ellas es el gas natural. Estados Unidos ha usado gas natural desde los años 40's, debido a su bajo costo y gran eficiencia es usado para cocinar, para la calefacción y también es ampliamente usado en la industria.

Para transportar el gas natural, este es licuado, lo que significa, que este gas es enfriado a temperaturas por debajo de -260 °F. Esto es hecho con propósitos prácticos y económicos; ya que como líquido, el gas natural ocupa únicamente 1/600 del volumen ocupado en su estado gaseoso.

El crecimiento en la demanda del gas natural a nivel mundial trajo consigo la aparición de algunos accidentes mayores, como el ocurrido en Cleveland, USA en 1944, donde una fuga de LNG y su posterior ignición, trajo consigo 128 muertos y 225 heridos afectando tanto a la planta como a la población civil; otro accidente importante fue el sucedido en Seoul, Korea en 1994, donde un error en el mantenimiento y operación de la planta dejó como resultado 12 muertos y 49 heridos; y finalmente el más reciente accidente en el manejo del LNG fue en Skkida, Algeria en 2004, donde fuego y posterior explosión en la planta de licuefacción resultó en 27 muertos y 74 heridos, además de pérdidas multimillonarias.

A pesar de los beneficios que el Gas Natural Licuado (LNG) trae a la población mundial, como se puede ver todavía existen ciertos riesgos que necesitan ser calculados. Para esto se hace necesario desarrollar un Análisis Cuantitativo de riesgo con el fin de identificar posibles peligros asociados al manejo del Gas natural licuado. Este trabajo esta enfocado a la seguridad en los terminales, aunque se mencionan algunos riesgos asociados al transporte del LNG.

El análisis de riesgo desarrollado en este trabajo esta complementado con el análisis de las variables que gobiernan la dispersión y explosión del LNG, en primera instancia se analizaron variaciones en la fuga del LNG tales como el tamaño del orificio y del tanque de almacenamiento, además de analizar el efecto que tienen las condiciones atmosféricas en la dispersión del LNG, el cual se encuentra al comienzo del capítulo 3.

Seguido a este análisis se estimó la frecuencia de ocurrencia de una serie de incidentes en diferentes escenarios, la cual resultó ser muy baja para la mayoría de los casos; para el análisis de consecuencias se utilizaron dos software, uno es Degadis, requerido por las regulaciones del LNG y el otro es un paquete comercial, denominado Canary, con el que cuenta el Mary Kay O'Connor Process

Safety Center, en donde se realizó el estudio. En este análisis de consecuencias se estimaron los efectos de la dispersión del LNG y también los efectos de la ignición de una piscina de fuego.

Para finalizar este estudio se cuantificaron diferentes clases de riesgo como lo son: el riesgo Humano, económico, ambiental y de imagen de la planta; todo esto con la ayuda de algunos parámetros de decisión y la matriz de cálculo del riesgo (RAM).

Todos los resultados mencionados anteriormente se encuentran en el capítulo 3, mientras que la descripción de la metodología y los parámetros utilizados para realizar cada uno de los análisis se encuentra en el capítulo 2.

Los riesgos obtenidos fueron en su mayoría aceptables y tolerables, debido a la baja probabilidad de ocurrencia de los diferentes incidentes, aunque algunos presentan un gran impacto en el terminal; lo que nos indica que sobre estos puntos vulnerables se deben realizar actividades de mantenimiento, intensificación de los mecanismos de mitigación y aplicar el diseño inherentemente seguro ^[1]

1. CONCEPTOS TEÓRICOS

El LNG es simplemente gas natural que ha sido enfriado hasta su estado líquido a presión atmosférica: -260°F (-162.2°C) y 14.7 psia. Actualmente el LNG importado a los Estados Unidos es comúnmente del 95% - 97% metano, con una combinación remanente de etano, propano y otros gases pesados, el LNG es transportado a presión ambiente. Al licuar el vapor de gas natural, se reduce el gas a un tamaño práctico para su transporte y almacenamiento, ya que se reduce el volumen que el gas ocupa en más de 600 veces.

El LNG es considerado como un líquido inflamable, además el vapor de LNG es incoloro, inodoro y no tóxico, y este vapor aparece típicamente como una nube blanca, ya que debido a su baja temperatura condensa el vapor de agua presente en la atmósfera. Los límites inferior y superior de inflamabilidad para el LNG se toman como los del metano y son 5.5% y 14% en volumen correspondiente a una temperatura de 25°C. En la tabla 1 se muestran las principales propiedades del LNG.

Tabla 1. Propiedades del gas natural licuado ^[2]

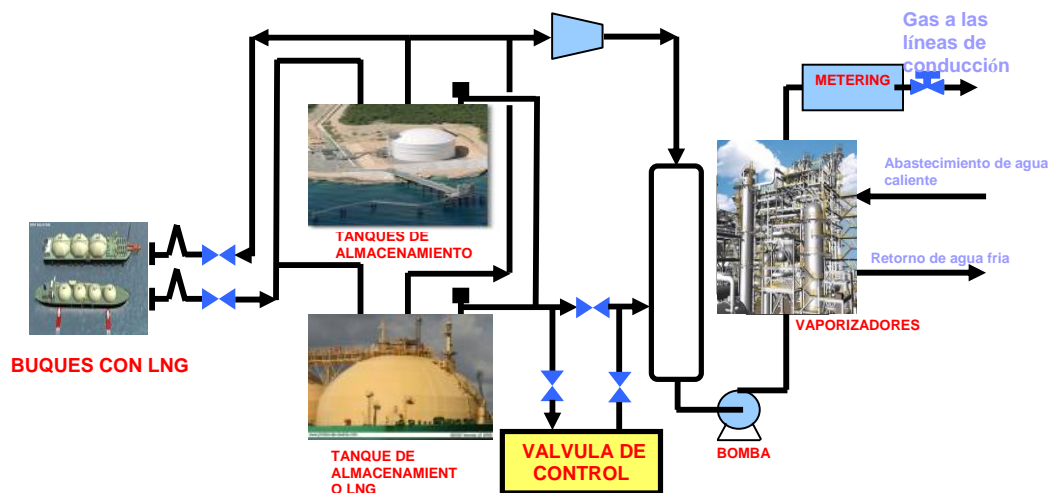
		LNG/Metano	Propano(LPG)
Flash point (°F)		< -259	< -155
Límites de Inflamabilidad (% en aire)	LFL	5	2.1
	UFL	15	9.5
Temperatura de Autoignición (°F)		1,000	840
Energía mínima de Ignición (BTU)		2.5 × 10⁻⁷	2.4 × 10⁻⁷
Gravedad específica Vapor		0.55	1.5

1.1 PROCESO DEL LNG

Un diagrama de flujo del proceso simplificado de un terminal de LNG, incluyendo un buque de carga y equipos relacionados es mostrado en la figura 1. Los terminales de LNG son diseñados y construidos de acuerdo a códigos como NFPA 59 A y US DOT 49 CFR 193 [3], las cuales están descritas en detalle en los anexos. El LNG es transferido desde el tanque del buque a un tanque de almacenamiento, usando las bombas internas del buque, las cuales a veces son complementadas con bombas de refuerzo ubicadas en el terminal. Generalmente el LNG es vaporizado usando el mismo gas natural como combustible y agua de mar o agua de proceso como líquido de intercambio de calor. Cada tanque en este sistema es equipado con las conexiones necesarias de carga y descarga, entrada de LNG atomizado, válvula de alivio y sensores de presión y temperatura.

Las conexiones de los tanques están conectadas a los cabezales (headers) del buque de LNG, los cuales son esencialmente manifolds para permitir la transferencia del líquido y el vapor desde y hacia los tanques.

Figura 1. Esquema general de una planta de regasificación de LNG.



1.2 ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGO (QRA) ^[4]

QRA es un método que identifica donde las operaciones, ingeniería, o el manejo de los sistemas pueden ser modificados para reducir el riesgo. La complejidad de un QRA depende de los objetivos del estudio y la información disponible. Los máximos beneficios resultan cuando los QRAs son usados al principio del proyecto (revisión conceptual y fases de diseño) y son mantenidos a través del ciclo de vida de la planta.

El método QRA esta diseñado para proveer al director de la planta con una herramienta que le ayude a evaluar el riesgo global de un proceso. Los QRAs son usados para evaluar riesgos potenciales cuando los métodos cualitativos no pueden darnos un adecuado entendimiento de los riesgos. El QRA es especialmente efectivo para evaluar estrategias alternativas para la reducción del riesgo.

Los pasos o etapas principales de un estudio QRA incluyen:

1. Definir la potencial secuencia de eventos y los potenciales incidentes.
2. Evaluar la consecuencia del incidente (las herramientas típicas para esta etapa incluyen modelamiento de la dispersión, fuego y explosión).
3. Estimar la potencial frecuencia de los accidentes usando árboles de eventos y árboles de defectos.
4. Estimar el impacto del incidente en la gente, ambiente o propiedad.
5. Estimar el Riesgo mediante la combinación de los impactos y la frecuencia, y reportarlo usando una matriz de riesgo o una gráfica.

En general, el método QRA es un procedimiento relativamente complejo que requiere de experiencia y un sustancial compromiso de recursos y tiempo. En algunas ocasiones esta complejidad puede no ser justificada; entonces la aplicación de otros métodos podría ser más apropiada.

1.3 ÁRBOLES DE SUCESOS (EVENT TREES) ^[4]

Los árboles de sucesos empiezan con el suceso iniciante y siguen avanzando hacia el resultado final. Este enfoque es inductivo. El método nos brinda información en como una falla puede ocurrir y la probabilidad de que ocurra.

Cuando un accidente ocurre en una planta, varios sistemas de seguridad entran en juego para prevenir que el accidente se propague. Estos sistemas de seguridad pueden fallar o tener éxito. El enfoque de árbol de sucesos incluye los efectos de la iniciación de un suceso seguido del impacto en los sistemas de seguridad.

Los pasos típicos en el análisis de árbol de sucesos son:

1. Identificar el suceso iniciante de interés.
2. Identificar las funciones de seguridad diseñadas para enfrentar el suceso iniciante.
3. Construir el árbol de sucesos, y
4. Describir la resultante secuencia de eventos.

Si están disponibles los datos adecuados, el procedimiento es usado para asignar valores numéricos a los diferentes sucesos.

Esto es usado efectivamente para determinar la probabilidad de cierta secuencia de eventos y para decidir que mejoras son requeridas.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

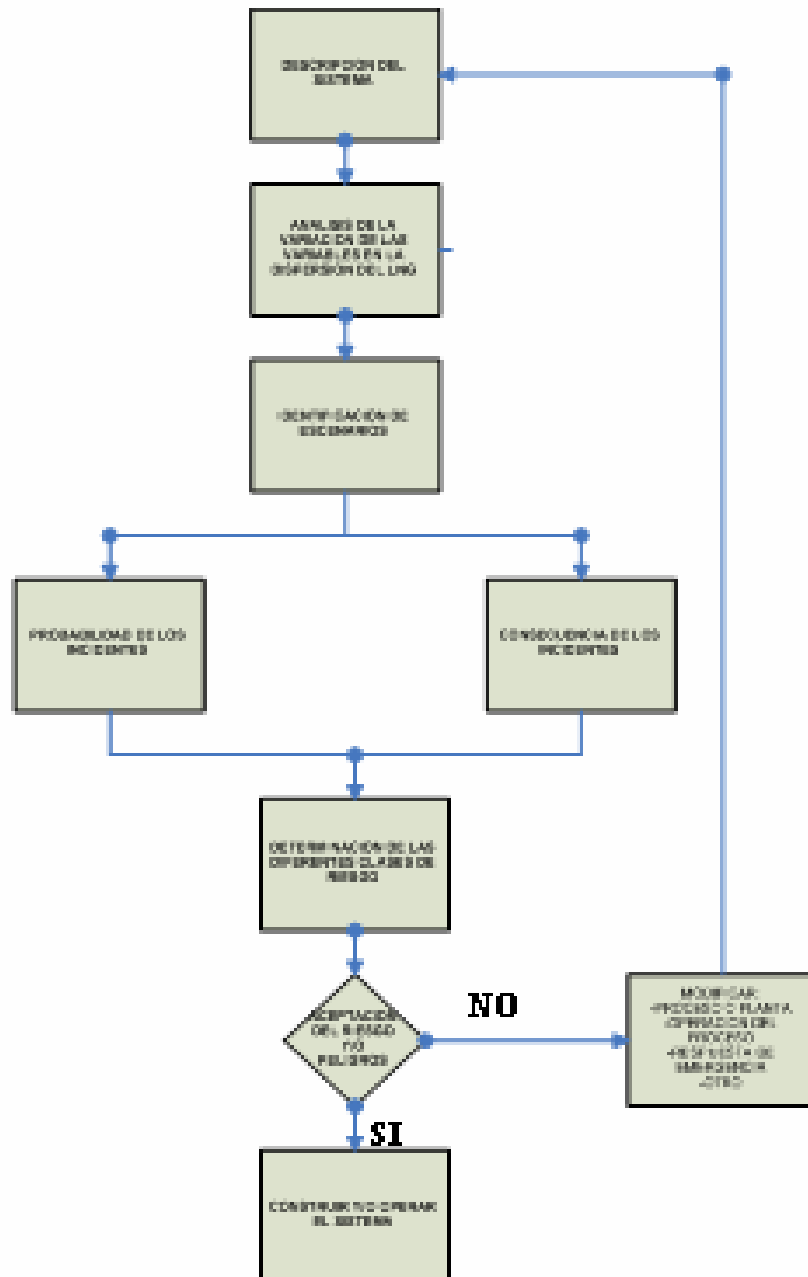
En la figura 2 se muestra el procedimiento normal usado para la identificación de escenarios y el cálculo del riesgo. Después de la descripción del proceso, los escenarios son identificados. En el presente trabajo además del análisis y cuantificación del riesgo se llevó a cabo un análisis de la variación de las variables que dominan la dispersión del LNG.

En primera instancia se identificaron varios posibles escenarios con la ayuda de expertos en el tema y con el análisis del sistema y los accidentes previos. Una vez se han establecidos los escenarios se procede a calcular la correspondiente probabilidad y consecuencia para cada escenario.

La información obtenida es ensamblada dentro de la matriz para el cálculo del riesgo, para de esta forma calcular los diferentes tipos de riesgo asociados a un terminal de LNG; los riesgos analizados en este estudio fueron el riesgo de pérdida de personas, de pérdidas económicas, riesgo ambiental y finalmente el riesgo de pérdida de imagen.

Si el riesgo es aceptable, entonces el estudio esta completo y el proceso es operable. Si el riesgo es inaceptable, entonces el sistema debe ser modificado y el procedimiento es reiniciado.

Figura 2. Procedimiento para el análisis cuantitativo de riesgo. [4]



2.1 IDENTIFICACIÓN DE ESCENARIOS

Una vez realizada la descripción del sistema y la identificación de peligros, las cuales se encuentran en el marco teórico y el anexo B respectivamente, se procedió a identificar los posibles escenarios en los cuales pueda ocurrir un incidente en el manejo del LNG, realizando un análisis de los accidentes presentados en el anexo C de este trabajo; se identificaron los siguientes escenarios:

- Una falla catastrófica del techo exterior de acero de uno de los tanques de almacenamiento de LNG
- Una ruptura completa de la línea de descarga de uno los tanques de almacenamiento de LNG
- Una ruptura completa de uno de los brazos de descarga en la plataforma de descarga
- Una ruptura completa del cabezal de descarga en la plataforma de descarga
- Una ruptura completa de la tubería de entrada a uno de los vaporizadores

Además de estos escenarios se identificó la falla catastrófica de un tanque de almacenamiento de LNG, la cual provoca la fuga de una gran cantidad de gas; este escenario fue utilizado para el análisis de las variables que afectan la dispersión del LNG, para lo cual se realizaron diferentes simulaciones variando las condiciones ambientales y de descarga.

2.2 METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LAS VARIABLES EN LA DISPERSIÓN DEL LNG

Para este análisis se dispuso de un escenario, el cual es la falla catastrófica de un tanque de almacenamiento de LNG y la posterior dispersión de una gran cantidad de gas, las variables a considerar en este análisis son las siguientes:

- Superficie sobre la cual el LNG se derrama
- Estabilidad atmosférica
- Tipo de incidente
- Ubicación del tanque de almacenamiento
- Tamaño del Orificio
- Tamaño del tanque

2.3 METODOLOGÍA PARA ESTIMACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE LOS INCIDENTES

Se procedió a calcular la frecuencia de que ocurra cada uno de los incidentes previamente descritos, esto con la ayuda de los event trees o árboles de sucesos. Este método está totalmente descrito en los fundamentos teóricos y se puede observar que es un procedimiento inductivo, es decir que se empieza con los eventos iniciantes ascendiendo hasta hallar la probabilidad de ocurrencia del evento principal, de esta forma se pudo estimar la frecuencia anual de ocurrencia para los siguientes eventos en cada escenario:

- Piscina o charco de fuego (pool fire)
- Flash/Piscina de fuego
- Dispersión (No Ignición)

En la tabla 2 se muestra el criterio utilizado para clasificar la probabilidad de ocurrencia de un incidente.

Tabla 2. Clasificación de la frecuencia ^[4]

Índice de frecuencia	Frecuencia del evento/año	Probabilidad asignada %	Clasificación	Descripción
1	<0.00001	0-20	Extraordinario	Un evento que nunca ha ocurrido pero que puede ocurrir con una pequeña probabilidad
2	<0.00001-0.001	20-40	Remoto	Incierto que ocurra una vez durante la vida operacional de las instalaciones
3	<0.001-0.1	40-60	Ocasional	Puede ocurrir de manera ocasional durante la vida de la planta
4	0.1-1	60-80	Moderado	Ocurre en promedio una vez por año
5	>1	80-100	Frecuente	Ocurre en promedio más de una vez por año

2.4 METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CONSECUENCIA DE CADA INCIDENTE

Una vez obtenida la frecuencia o probabilidad de ocurrencia de cada uno de los incidentes se calculó la consecuencia de cada incidente, esto se llevo a cabo usando diferentes modelos, por ejemplo para la dispersión del LNG se utilizó DEGADIS que es el modelo requerido por las regulaciones, también se usó CANARY, este software nos permite una mejor visualización y por lo tanto una mejor interpretación de los resultados. Para la dispersión del LNG se realizaron simulaciones con diferentes condiciones, se simuló el peor caso (worst case scenario) y también se simuló a las condiciones climáticas predominantes en la región donde están ubicadas algunas de las plantas de regasificación de LNG, el golfo de México; las distancias de interés para la dispersión fueron los límites de inflamabilidad inferior y superior, aunque también se reporto la distancia a la mitad del límite de inflamabilidad inferior. Para completar el análisis de consecuencias se evaluó el impacto a la radiación térmica, evaluando las distancias a las cuales se encuentran los 3 niveles de radiación requeridos por la normatividad, estos niveles son 1.5, 4 y 37.5 Kw/m² [6], que corresponden respectivamente a peligro por exposición continua, peligro a las personas y daños a la infraestructura del terminal.

2.5 PARÁMETROS PARA LA DETERMINACIÓN DEL RIESGO

Para finalizar y poder encontrar una medida del riesgo se utilizó la matriz de evaluación de riesgo, la cual se muestra en la tabla 7, en esta matriz se combinan las frecuencias con las consecuencias, y de esta forma poder tomar decisiones en cuanto a la seguridad del Terminal. Se cuantificaron las siguientes clases de riesgo:

- Riesgo humano
- Riesgo ambiental

- Riesgo de pérdidas económicas
- Riesgo de pérdida de imagen

Dependiendo de la combinación resultante de la consecuencia con el frecuencia, el incidente tomara un valor y una posición en la matriz de riesgo, esto nos define si el riesgo es aceptable, tolerable o inaceptable.

- **Nivel aceptable:** los escenarios ubicados en esta área de la matriz no presentan un riesgo significativo, lo que no amerita la inversión inmediata de recursos y no se requieren acciones específicas sobre los elementos vulnerables considerados en el escenario. El número matricial de riesgo corresponde a un valor entre 1 y 5.
- **Nivel tolerable:** Los escenarios agrupados en esta área implican el desarrollo de actividades que disminuyan el riesgo, aunque tienen un nivel de prioridad de segundo nivel. El número matricial del riesgo para este nivel se encuentra entre 4 y 12.
- **Nivel inaceptable:** Los escenarios ubicados en esta área ameritan que se desarrollen acciones prioritarias e inmediatas de protección y prevención debido al alto impacto que tendrían sobre el entorno. Valores de número matricial de riesgo entre 10 y 25 se ubican en el nivel de inaceptables.

2.5.1 Riesgo Humano

Para determinar el riesgo humano se utilizaron los criterios mostrados en la tabla 3 con el fin de determinar la gravedad de las consecuencias para cada uno de los escenarios a analizar.

Tabla 3. Cuantificación de afectación a personas

CUANTIFICACIÓN DE AFECTACIÓN A PERSONAS		
VALOR	GRAVEDAD	DESCRIPCIÓN
1	Insignificante	Sin lesiones
2	Limitado	Lesión temporal (con incapacidad)
3	Grave	Lesión con incapacidad permanente
4	Muy grave	Hasta 5 muertos o 20 heridos o menos de 500 evacuados
5	Catastrófico	Más de 20 muertos o más de 100 heridos o más de 500 evacuados

2.5.2 Riesgo Ambiental

En la tabla 4 se muestran los parámetros utilizados para clasificar la contaminación ambiental que cada uno de los escenarios provoca.

Tabla 4. Cuantificación de contaminación ambiental

CUANTIFICACIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL (AIRE, AGUA, FLORA Y FAUNA)		
VALOR	GRAVEDAD	DESCRIPCIÓN
1	Insignificante	Sin contaminación
2	Limitado	Efectos localizados y remediables
3	Grave	Efectos dispersos con limitada remediación
4	Muy grave	Efectos dispersos no

		remediables
5	Catastrófico	Daños permanentes

2.5.3 Riesgo de Pérdidas Económicas

Para cuantificar las pérdidas económicas provenientes de los diferentes incidentes se utilizó la tabla 5.

Tabla 5. Cuantificación de pérdidas económicas

CUANTIFICACIÓN DE PÉRDIDAS ECONÓMICAS		
VALOR	GRAVEDAD	DESCRIPCIÓN
1	Insignificante	Hasta US \$1.000
2	Limitado	De US \$1.000 a US \$10.000
3	Grave	De US \$10.000 a US \$100.000
4	Muy grave	De US \$100.000 a US \$1.000.000
5	Catastrófico	Mas de US \$1.000.000

2.5.4 Riesgo de pérdida de imagen

En la tabla 6 se muestra el criterio que se utilizó para cuantificar la pérdida de imagen debida a cada uno de los accidentes.

Tabla 6. Cuantificación de pérdida de imagen

CUANTIFICACIÓN DE PÉRDIDA DE IMAGEN		
VALOR	GRAVEDAD	DESCRIPCIÓN
1	Insignificante	Difusión interna
2	Limitado	Difusión local
3	Grave	Difusión regional
4	Muy grave	Difusión nacional
5	Catastrófico	Difusión Internacional

Tabla 7. Matriz para la evaluación del riesgo

CONSECUENCIA					PROBABILIDAD				
CLASE	LESIONES A PERSONAS	DAÑOS A BIENES	EFECTOS AL AMBIENTE	IMPACTO A LA REPUTACIÓN	1	2	3	4	5
					Nunca escuchado en la industria	Incidente escuchado en la industria	Incidente ocurrido en nuestra planta	Se produce varias veces al año en la planta	Se produce varias veces al año en el lugar
1	Lesión leve	Daño leve	Efecto leve	Impacto leve	1	2	3	4	5
2	Lesión Menor	Daño menor	Efecto menor	Impacto limitado	2	4	6	8	10
3	Lesión Mayor	Daño localizado	Efecto localizado	Impacto considerable	3	6	9	12	15
4	1 a 3 fatalidades	Daño mayor	Efecto mayor	Impacto nacional	4	8	12	16	20
5	Múltiples fatalidades	Daño generalizado	Efecto masivo	Impacto internacional	5	10	15	20	25

Aceptable

Tolerable

Inaceptable

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 ANÁLISIS DE LAS VARIABLES QUE INFLUYEN EN LA DISPERSIÓN Y EXPLOSIÓN DEL LNG

Para este análisis se dispuso de 6 diferentes escenarios, los cuales están descritos en la tabla 8, como se puede observar se utilizaron 3 escenarios para el caso del tanque de almacenamiento en tierra y 3 para el almacenamiento en el buque de LNG, para cada caso de almacenamiento se simularon tres diferentes tamaños de orificio, adicionalmente dos de los tres casos fueron incidentes accidentales y el restante se supuso como intencional, de ahí los tamaños del orificio.

Tabla 8. Descripción de los escenarios utilizados para el análisis de las variables de dispersión y explosión del LNG.

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6
Tipo de Incidente	Accidental	Accidental	Intencional	Accidental	Accidental	Intencional
Temperatura de almacenamiento	-162 °C	-162 °C	-162 °C	-162 °C	-162 °C	-162 °C
Ubicación del Tanque en el cual ocurre la fuga	En tierra	En tierra	En tierra	En el buque de LNG	En el buque de LNG	En el buque de LNG
Tamaño del orificio	0.5m ² (D=0.8m)	1.5m ² (D=1.38m)	6.0m ² (D=2.76m)	0.5m ² (D=0.8m)	1.5m ² (D=1.38m)	6.0m ² (D=2.76m)
Tamaño del tanque	140,000m ³	140,000m ³	140,000m ³	37,500m ³	37,500m ³	37,500m ³

Dike	No	No	No	No	No	No
dirección y velocidad del viento	2.5m/s SW	2.5m/s SW	2.5m/s SW	2.5m/s SW	2.5m/s SW	2.5m/s SW
Estabilidad atmosférica	A (Inestable) C (Neutral) F (Estable)	A (Inestable) C (Neutral) F (Estable)	A (Inestable) C (Neutral) F (Estable)	A (Inestable) C (Neutral) F (Estable)	A (Inestable) C (Neutral) F (Estable)	A (Inestable) C (Neutral) F (Estable)
Concentración de interés	44,000 ppm 22,000 ppm	44,000 ppm 22,000 ppm	44,000 ppm 22,000 ppm	44,000 ppm 22,000 ppm	44,000 ppm 22,000 ppm	44,000 ppm 22,000 ppm
Tipo de superficie	Concreto	Concreto	Concreto	Agua	Agua	Agua
Humedad relativa	70%	70%	70%	70%	70%	70%

De acuerdo con el reporte realizado por los laboratorios nacionales Sandia ^[6], para fugas accidentales, el rango de área de apertura es de 0.5-1.5 m², para el caso de una fuga intencional el área creíble varía de 2-12 m².

Lo anterior nos indica que la zona afectada por una fuga intencional podría ser más grande que para una fuga accidental.

En la tabla 9 se puede apreciar los resultados de las diferentes simulaciones, se muestran resultados referentes a la descarga del material, vaporización de la piscina, distancia de los límites de flamabilidad, efectos del jet fire, radiación térmica proveniente de la piscina de fuego y parámetros de la explosión ^[7].

Tabla 9. Resultados de las simulaciones usando PHAST®

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6
Resultados de descarga						
Fracción de líquido	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Velocidad Final	21.72 m/s	21.72 m/s	21.72 m/s	21.72 m/s	21.72 m/s	21.72 m/s
Diámetro de la gota	0.29 mm	0.29 mm	0.29 mm	0.29 mm	0.29 mm	0.29 mm
Coefficiente de descarga	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
Resultados de la vaporización de la piscina						
Líquido Rainout (Fracción)						
Categoría 2.5 A	0.936370	0.955208	0.979998	0.936370	0.955208	0.979998
Categoría 2.5 C	0.942920	0.959044	0.979947	0.942920	0.959044	0.979947
Categoría 2.5 F	0.946687	0.960514	0.980002	0.946687	0.960514	0.980002
Radio máximo de la piscina						
Categoría 2.5 A	252.076 m	449.361 m	797.758 m	252.076 m	387.439 m	532.974 m
Categoría 2.5 B	252.693 m	450.187 m	798.013 m	252.693 m	388.141 m	533.064 m
Categoría 2.5 F	254.390 m	452.708 m	802.012 m	254.390 m	390.186 m	534.809 m
Distancia a la concentración						
UFL (165,000 ppm)						
Categoría 2.5/A	156.59 m	223.17 m	275.94 m	156.59 m	213.51 m	236.39 m
Categoría 2.5/C	193.63 m	275.74 m	406.67 m	193.63 m	290.72 m	325.92 m
Categoría 2.5/F	208.25 m	300.86 m	446.40 m	208.25 m	301.56 m	429.69 m
LFL (44,000 ppm)						
Categoría 2.5/A	378.15 m	578.23 m	777.92 m	378.15 m	557.48 m	710.07 m
Categoría 2.5/C	692.82 m	1,260.12 m	1,744.49 m	692.82 m	1,187.77 m	1,723.34 m
Categoría 2.5/F	2,304.98 m	3,957.04 m	9,778.19 m	2,304.98 m	4,074.66 m	8,834.00 m

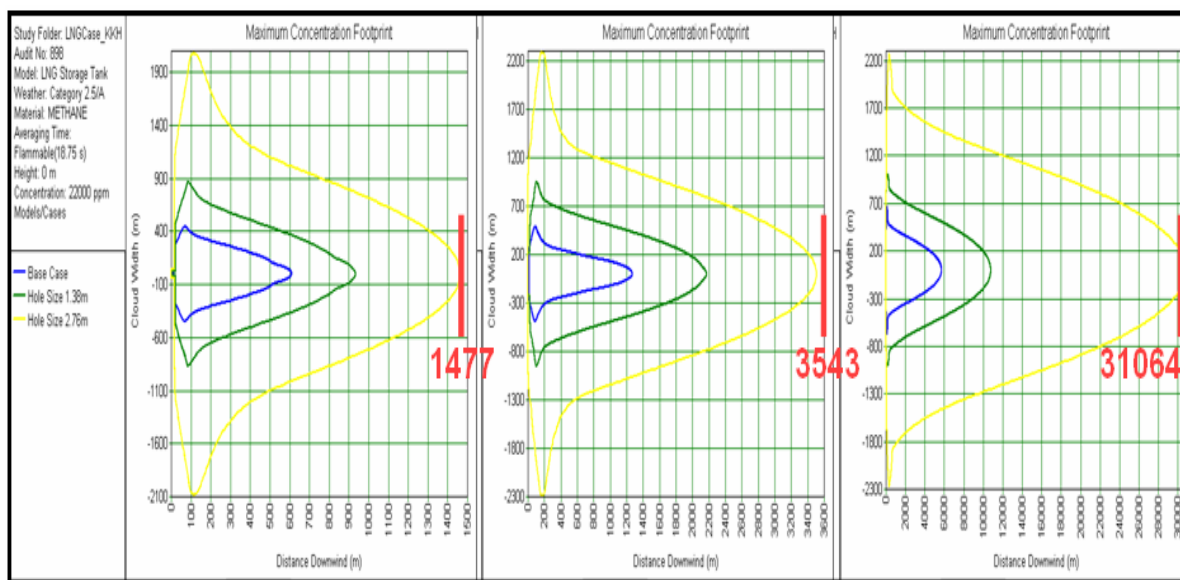
½ LFL (22,000 ppm)						
Categoría 2.5/A	615.28 m	941.76 m	1,477.26 m	615.28 m	938.05 m	2,439.28 m
Categoría 2.5/C	1,280.24 m	1,191.45 m	3,543.03 m	1,280.24 m	2,300.27 m	3,535.64 m
Categoría 2.5/F	5,773.11 m	10,872.20 m	31,064.10m	5,773.11 m	11,150.30 m	26,092.90 m
Efectos del Jet fire						
Nivel de radiación 4 kW/m2						
Categoría 2.5/A	620.73 m	855.36 m	1,099.38 m	620.73 m	855.36 m	1,099.38 m
Categoría 2.5/C	592.13 m	822.82 m	1,100.59 m	592.13 m	822.82 m	1,100.59 m
Categoría 2.5/F	574.83 m	809.90 m	1,099.29 m	574.83 m	809.90 m	1,099.29 m
Nivel de radiación 37.5 kW/m2						
Categoría 2.5/A	412.74 m	570.40 m	733.86 m	412.74 m	570.40 m	733.86 m
Categoría 2.5/C	393.49 m	548.57 m	734.68 m	393.49 m	548.57 m	734.68 m
Categoría 2.5/F	381.84 m	539.89 m	733.81 m	381.84 m	539.89 m	733.81 m
Efectos de la piscina de fuego temprana						
Nivel de radiación 4 kW/m2						
Categoría 2.5/A	613.36 m	946.16 m	1,618.80 m	613.36 m	946.16 m	1,618.80 m
Categoría 2.5/C	614.99 m	941.91 m	1,618.77 m	614.99 m	941.91 m	1,618.77 m
Categoría 2.5/F	613.54 m	943.56 m	1,620.40 m	613.54 m	943.56 m	1,620.40 m
Nivel de radiación 37.5 kW/m2						
Categoría 2.5/A	234.62 m	362.13 m	611.71 m	234.62 m	362.13 m	611.71 m
Categoría 2.5/C	235.22 m	356.96 m	611.70 m	235.22 m	356.96 m	611.70 m
Categoría 2.5/F	233.18 m	358.27 m	613.31 m	233.18 m	358.27 m	613.31 m
Efectos de la explosión (ignición tardía)						
0.2068 bar for maximum distance						
Category 2.5/A	901.32 m	1,419.51 m	2,391.27 m	901.32 m	1,466.88 m	1,667.05 m
Category 2.5/C	1,642.37 m	2,855.55 m	4,419.19 m	1,642.37 m	2,996.30 m	2,908.86 m
Category 2.5/F	6,367.61 m	11,827.60 m	16,647.50m	6,367.61 m	10,315.4 m	16,725.5 m
Datos suplementarios a 0.2068 bar						
Masa inflamable utilizada						
Categoría 2.5/A	78,891 kg	351,804 kg	2,494,970 kg	78,891 kg	493,781 kg	713,778 kg
Categoría 2.5/C	151,830 kg	940.697 kg	3,478,400 kg	151,830 kg	1,077,190 kg	1,876,220 kg
Categoría 2.5/F	681,011 kg	2,802,140 kg	1,178,820 kg	681,011 kg	- kg	- kg
Radio de sobre presión						
Categoría 2.5/A	291.32 m	479.51 m	921.27 m	291.32 m	536.88 m	784.52 m
Categoría 2.5/C	362.37 m	665.55 m	1,029.19 m	362.37 m	696.30 m	437.93 m
Categoría 2.5/F	596.61 m	957.62 m	717.54 m	597.61 m	- m	- m

En la mayoría de los escenarios identificados, los efectos potenciales de radiación térmica y sobrepresión son esperados de la piscina de fuego y de la dispersión de la nube de vapor, basados en la alta probabilidad de encontrar fuentes de ignición.

Los resultados presentados en la tabla 9 y las figuras en el anexo G muestran una tendencia muy marcada al aumento de todos los parámetros analizados, al aumentar tanto el tamaño del orificio y el tamaño del tanque. En cuanto a la estabilidad atmosférica, podemos apreciar que también la mayoría de los parámetros aumentan al pasar de una estabilidad A (inestable) a una estabilidad F (estable). El único caso en que esta tendencia no estuvo presente fue en el jet fire, en el cual se observó que para tamaños de orificio bastante grandes la mayor distancia a la radiación, ósea el mayor impacto, es causado en condiciones de estabilidad atmosférica C (neutra); por el contrario en el caso de diámetros de orificio no tan grandes se presentó la tendencia de aumentar la zona afectada al pasar de estabilidades A a F.

En la figura 3 se puede observar un ejemplo de la tendencia anteriormente mencionada, las distancias al límite de inflamabilidad inferior aumentan notablemente al aumentar el tamaño del orificio, así como también al variar la estabilidad atmosférica; para la estabilidad atmosférica clase A y diámetro de orificio de 2.76 m, se encontró que la distancia al límite inferior de inflamabilidad es de 1477 m, y con solo variar la estabilidad atmosférica al tipo F, se encontró que la distancia a dicho límite aumenta a 31 064 m, es decir se afectarían zonas que están a 30 kilómetros de la planta.

Figura 3. Dispersión en la dirección del viento para un agujero de diámetros 0.08m, 1.38m y 2.76m y condiciones climáticas: velocidad del viento 2.5m/s, estabilidad atmosférica A/C/F para concentración de 22,000ppm



Estabilidad •
 Atmosferica •

A

C

F

Cabe aclarar que el anterior escenario fue el que presentó la mayor zona afectada en cuanto a la dispersión del LNG, y por supuesto se trata de un incidente intencional en un tanque que almacena cerca de 140 000 m³ de LNG y su probabilidad de ocurrencia esta clasificada como extraordinaria.

Las consecuencias o impactos en las personas, ambiente e infraestructura de la planta dependen en gran medida de los parámetros acá analizados, es decir dependen del tipo de accidente, intencional o accidental, de las condiciones atmosféricas predominantes al momento del incidente, así como también de las estrategias de prevención, mitigación y control con las que cuente el terminal.

3.2 ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS

En la tabla 10 se resumen los resultados de la simulación para los escenarios del 7 al 11, los cuales fueron utilizados para la cuantificación de las diferentes clase de riesgo. Para esto se dispuso de dos diferentes software, Canary y Degadis, y además se simularon dos clases de escenarios, el escenario del peor caso y el de las condiciones predominantes en la región.

Tabla 10. Resultados de la simulación de la dispersión de LNG para los escenarios 7 al 11 usando Degadis y Canary.

Escenario No.	Descripción del escenario	Modelo	Condiciones Climáticas	Distancia : (m)		
				50% LFL	LFL	UFL
7	Falla del techo de un tanque de almacenamiento de LNG	DEGADIS	2.5m/s,27°C, estabilidad D, 90% Hr	Degadis solo modela fugas verticales y reporta el punto en que la pluma toca el suelo, en este caso la nube inflamable nunca alcanza el suelo ^[8]		
			7.5 m/s, 32°C, estabilidad F, 90% Hr			
		CANARY	2.5m/s,27°C, estabilidad D, 90% Hr	117	68	15
			7.5 m/s, 32°C, estabilidad F, 90% Hr	64	51	21

8	Ruptura completa de la línea de descarga de un tanque de almacenamiento de LNG	DEGADIS	2.5m/s,27°C, estabilidad D, 90% Hr	500	177	86
			7.5 m/s, 32°C, estabilidad F, 90% Hr	576	340	178
		CANARY	2.5m/s,27°C, estabilidad D, 90% Hr	497	153	74
			7.5 m/s, 32°C, estabilidad F, 90% Hr	519	334	112
9	Falla de un brazo de descarga de LNG	DEGADIS	2.5m/s,27°C, estabilidad D, 90% Hr	837	278	148
			7.5 m/s, 32°C, estabilidad F, 90% Hr	1054	520	270
		CANARY	2.5m/s,27°C, estabilidad D, 90% Hr	901	365	117
			7.5 m/s, 32°C, estabilidad F, 90% Hr	1069	585	216
10	Falla del cabezal de descarga de LNG	DEGADIS	2.5m/s,27°C, estabilidad D, 90% Hr	458	202	101
			7.5 m/s, 32°C, estabilidad F, 90% Hr	904	474	125
		CANARY	2.5m/s,27°C,	436	237	114

			estabilidad D, 90% Hr			
			7.5 m/s, 32°C, estabilidad F, 90% Hr	853	543	237
11	Falla en la línea de entrada al vaporizador de alta presión	DEGADIS	2.5m/s,27°C, estabilidad D, 90% Hr	Degadis solo modela fugas verticales y reporta el punto en que la pluma toca el suelo, en este caso la nube inflamable nunca alcanza el suelo [8]		
			7.5 m/s, 32°C, estabilidad F, 90% Hr			
		CANARY	2.5m/s,27°C, estabilidad D, 90% Hr	127	90	21
			7.5 m/s, 32°C, estabilidad F, 90% Hr	121	115	35

Los datos de salida de los programas utilizados en la dispersión no varían mucho entre sí y siguen la misma tendencia.

Los resultados de la radiación térmica están presentados en la tabla 11, como ya se mencionó se reportaron las distancias a los niveles de radiación requeridos por la normatividad.

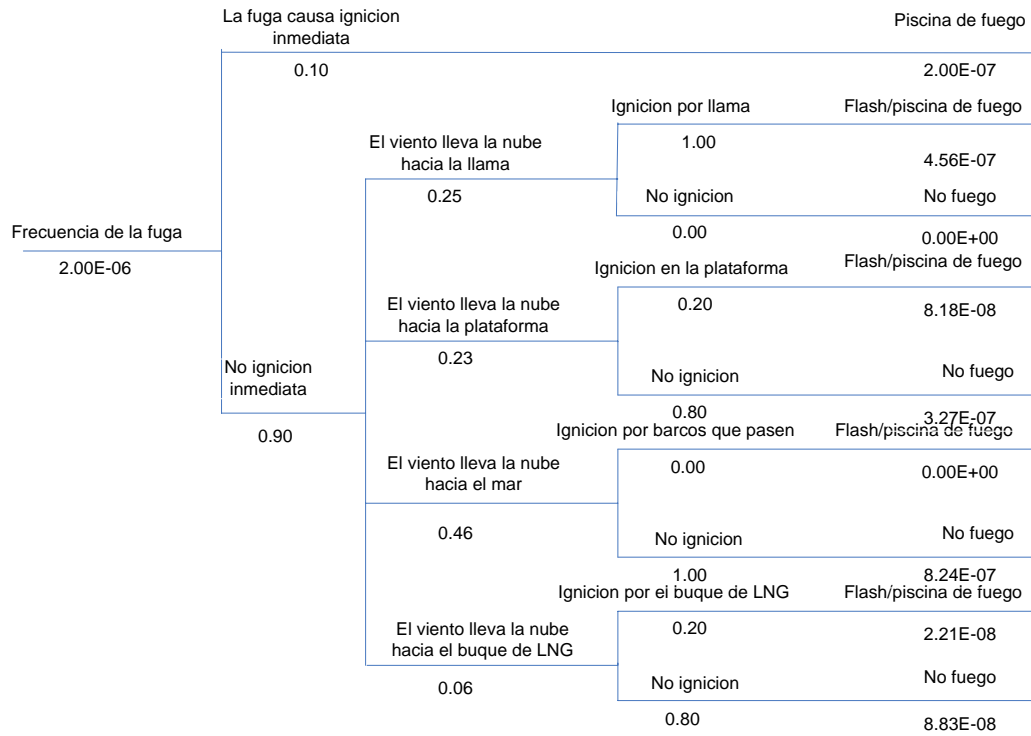
Tabla 11. Resultados de la simulación de una piscina de fuego para los escenarios 7 al 11 usando LNGFIRE3 y Canary.

Escenario No.	Distancia a: (m)					
	1.5 kW/m ²		4 kW/m ²		37.5 kW/m ²	
	LNGFIRE3	CANARY	LNGFIRE3	CANARY	LNGFIRE3	CANARY
7	265	278	218	231	142	161
8	285	314	238	260	163	166
9	432	451	357	368	238	247
10	224	238	183	199	110	123
11	199	227	162	168	96	104

3.3 ANÁLISIS DE LA PROBABILIDAD DE LOS EVENTOS IDENTIFICADOS

En la figura 4 se muestra la metodología del árbol de sucesos, la cual se utilizó para hallar la probabilidad de ocurrencia de cada uno de los incidentes. La probabilidad de los eventos base fue obtenida de la literatura ^[9]; el resto de árboles de sucesos se encuentran en el anexo E.

Figura 4. Escenario 7 – Árbol de eventos para una fuga sin mitigar



En la tabla 12 se resumen las probabilidades de los incidentes de interés para cada escenario, se observa que las probabilidades para la mayoría de los incidentes están en el rango de extraordinario y remoto, excepto para el escenario 9, falla en un brazo de descarga del LNG, que es ocasional; lo que nos da una idea de la naturaleza de estos incidentes.

Tabla 12. Probabilidad de ocurrencia anual para los escenarios 7 al 11

Escenario No.	Descripción del escenario	Piscina de fuego	Flash/Piscina de fuego	Dispersión (No ignición)	Clasificación	Índice de frecuencia
7	Falla del techo de un tanque de almacenamiento de LNG	2.00E-07	5.60E-07	1.24E-06	Extraordinario	1
8	Ruptura completa de la línea de descarga de un tanque de almacenamiento de LNG	3.94E-06	1.32E-05	2.22E-05	Remoto	2
9	Falla de un brazo de descarga de LNG	7.99E-04	2.16E-03	5.03E-03	Ocasional	3
10	Falla del cabezal de descarga de LNG	2.66E-06	6.81E-06	1.71E-05	Extraordinario	1
11	Falla en la línea de entrada al vaporizador de alta presión	7.55E-05	1.93E-04	4.86E-04	Remoto	2

3.4 CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO

Se procedió a realizar la combinación de las consecuencias y las probabilidades previamente halladas, con el fin de hallar los diferentes tipos de riesgo asociados a cada uno de los escenarios.

3.4.1. Cuantificación del riesgo de pérdidas humanas. La gravedad de cada incidente se evaluó de acuerdo a la distancia a la radiación de 4 Kw/m², la cual produce quemaduras de segundo grado.

De acuerdo a la probabilidad de cada incidente y la distancia a este nivel de radiación, se cuantificó el riesgo humano para cada incidente, el cual se muestra en la tabla 13, donde E7 = Escenario 7, E8 = Escenario 8, etc.

Tabla 13. Matriz de riesgo de pérdidas humanas

		PROBABILIDAD					
		1	2	3	4	5	
CONSECUENCIA		Extraordinario	Remoto	Ocasional	Moderado	Frecuente	
	1	Insignificante	1	2	3	4	5
	2	Limitado	2	4	6	8	10
	3	Grave	E7	E8	9	12	15
	4	Muy grave	E10	E11	12	16	20
	5	Catastrófico	5	10	E9	20	25

Aceptable

Tolerable

Inaceptable

Los escenarios 7 y 10 presentan un riesgo humano aceptable, debido a su baja probabilidad de ocurrencia; los escenarios 8 y 11 presentan un riesgo tolerable, por el contrario el escenario 9, falla de un brazo de descarga presenta un nivel de

riesgo inaceptable debido a su relativa alta probabilidad y muy alto nivel de consecuencia, lo que quiere decir que para este caso se necesitan medidas inmediatas de prevención, mitigación y control.

3.4.2. Cuantificación del riesgo ambiental. Debido a la naturaleza del LNG y la ubicación del Terminal, mar adentro, las consecuencias al ambiente se limitan a la posible contaminación del aire por la combustión del LNG, ya que el LNG al entrar en contacto con el agua se vaporiza muy rápidamente y no estaría en contacto con ninguna especie de fauna marina. Por lo anterior se asignó una gravedad limitada para todos los incidentes. En la tabla 14 se muestran los resultados.

Tabla 14. Matriz de riesgo Ambiental

		PROBABILIDAD					
		1	2	3	4	5	
CONSECUENCIA		Extraordinario	Remoto	Ocasional	Moderado	Frecuente	
	1	Insignificante	1	2	3	4	5
	2	Limitado	E7 - E10	E8 - E11	E9	8	10
	3	Grave	3	6	9	12	15
	4	Muy grave	4	8	12	16	20
	5	Catastrófico	5	10	15	20	25

Aceptable

Tolerable

Inaceptable

En general, los incidentes presentan un riesgo ambiental aceptable, lo que nos indica que no requiere ninguna acción específica, ni modificación en el sistema.

3.4.3. Cuantificación del riesgo de pérdidas económicas. La gravedad de cada incidente se evaluó de acuerdo a la distancia a la radiación de 37.5 Kw/m², ya que

este nivel de radiación podría causar daño significativo a las estructuras, equipos y maquinaria en general. También se tuvo en cuenta la cercanía a la fuente de la fuga, ya que las estructuras presentarían daño criogénico al contacto con el LNG.

Para los escenarios donde la fuga proviene del tanque, solo se ve afectado el mismo por el nivel de radiación concerniente; igual sucede para los incidentes localizados en la plataforma de regasificación; por el contrario para la falla en el brazo de descarga se ve afectado los tanques de almacenamiento, las dos plataformas y el buque de transporte de LNG.

De acuerdo a la probabilidad de cada incidente y la distancia a este nivel de radiación, se cuantificó el riesgo de pérdidas económicas para cada incidente, el cual se muestra en la tabla 15.

Tabla 15. Matriz de riesgo de pérdidas económicas

		PROBABILIDAD					
		1	2	3	4	5	
CONSECUENCIA		Extraordinario	Remoto	Ocasional	Moderado	Frecuente	
	1	Insignificante	1	2	3	4	5
	2	Limitado	2	4	6	8	10
	3	Grave			9	12	15
	4	Muy grave	E10 - E7	E11 - E8	12	16	20
	5	Catastrófico	5	10	E9	20	25

Aceptable

Tolerable

Inaceptable

Los escenarios 7, 8, 10 y 11 presentan riesgos aceptables y tolerables, aunque sus consecuencias son muy graves para la economía del Terminal. El incidente 9 presenta un riesgo inaceptable ya que compromete la totalidad del Terminal,

incluyendo el buque de transporte de LNG. Por lo tanto se debe revisar la operación de descarga del LNG y revisar la integridad de los brazos de descarga.

3.4.4. Cuantificación del riesgo de pérdida de imagen. La difusión del incidente depende en gran parte del número de muertos y heridos, pérdidas económicas y daño ambiental; para este estudio la cuantificación del riesgo de pérdida de imagen se basó en el número de muertos y heridos que puede presentar cada incidente. Los resultados se presentan en la tabla 16.

Tabla 16. Matriz de riesgo de pérdida de imagen

		PROBABILIDAD					
		1	2	3	4	5	
CONSECUENCIA		Extraordinario	Remoto	Ocasional	Moderado	Frecuente	
	1	Insignificante	1	2	3	4	5
	2	Limitado	2	4	6	8	10
	3	Grave	E7	E8	9	12	15
	4	Muy grave	E10	E11	12	16	20
	5	Catastrófico	5	10	E9	20	25

Aceptable

Tolerable

Inaceptable

Por lo tanto los incidentes 7 y 8 tendrían una difusión regional, los incidentes 10 y 11 una difusión nacional y el incidente 9 debido a sus grandes consecuencias tendría una difusión internacional, lo que no es bueno para la planta y en general para la economía del gas natural licuado.

4. CONCLUSIONES

A través del trabajo realizado se obtuvo una valoración cuantitativa del riesgo de pérdidas humanas, pérdidas económicas, ambientales y de imagen, en un terminal de Gas Natural licuado; presentando en su mayoría riesgos con niveles aceptables y tolerables, lo que implica el desarrollo de algunas actividades sobre los elementos vulnerables considerados en cada escenario.

La dispersión y los efectos de la radiación de una fuga de Gas Natural Licuado están gobernados por las condiciones de descarga, tales como tamaño del orificio y tanque, y por las condiciones atmosféricas predominantes en la zona al momento de la fuga.

Las matrices de cálculo final del riesgo obtenidas, permiten a los administradores del terminal tomar decisiones en cuanto a si se deben realizar modificaciones al diseño o la operación de la planta.

El escenario con la consecuencia y probabilidad, y por consiguiente riesgos más altos fue el identificado como una falla de un brazo de descarga de LNG, lo cual debe ser tenido en cuenta en el diseño y operación del sistema.

5. RECOMENDACIONES

Utilizar una herramienta mas poderosa para el análisis de consecuencias de una fuga de LNG, se recomienda el uso de un Computational Fluid Dynamics, por ejemplo paquetes computacionales como: FLUENT®, Fem3a o FLACS® (Flame Accelerator Computational Simulator); esto podría dar una mejor visualización de la dispersión y de la explosión del LNG y por lo tanto tener mayor certeza de las consecuencias de la fuga.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Trevor A. Kletz, Benefits and risk : their assessment in relation to human needs, 1980
- [2] Energy Analysts Inc., Environmental Impact for the Bish Cove LNG Liquefaction Terminal, Oklahoma, 1981
- [3] H.H. West, M. Sam Mannan, LNG Safety Practice & Regulation 'From the 1944 East Ohio tragedy to today's safety record, AIChE Meeting, 2001
- [4] Crowl, D.A., y J. F. Louvar, "Chemical Process Safety-Fundamentals with Applications," 2nd edition, Prentice Hall, 2002.
- [5] National Fire Protection Association (NFPA), Standard for the Production, Storage, y Handling of Liquefied Natural Gas, Quincy, 1996
- [6] Sandia National Laboratories, Guidance on Risk Analysis y Safety Implications of a Large Liquefied natural Gas (LNG) Spill over Water, 2004
- [7] PHAST Process Hazard Analysis Software Tool, DNV UK
- [8] Harry H West, Yuanhua Qiao, y M.Sam Mannan, LNG-Water Rapid Phase Transition: Part 1-A Literature Review, LNG Journal, May 2005, 21-24
- [9] Frank P. Lees, Loss Prevention in the Process Industries, Reed educational y Professional publishing Ltd, 1996

ANEXO A. DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LOS ESCENARIOS

NOTA: La descripción para los escenarios 1 al 6 se resume en la tabla 8.

ESCENARIO 7: Falla del techo de un tanque de almacenamiento de LNG

Este escenario asume la falla catastrófica del techo de acero externo de uno de los tanques de almacenamiento de LNG. La falla resulta en la evaporación y dispersión del LNG.

SUPOSICIONES:

- Un tanque de almacenamiento de LNG, aislado, (tanque de acero con 9% níquel, con un techo exterior de acero y paredes de concreto reforzado) con una capacidad de 150.000 m³ (40 millones de galones), 78.6 m de diámetro interior y 31 m de altura (altura llena de líquido)
- El tanque opera a -160 °C (-256 °F) y se asume lleno al momento de este evento.

ESCENARIO 8: Falla de la línea de descarga del tanque de almacenamiento de LNG

Este escenario asume que la ruptura completa de la única línea de descarga (tubería de doble pared) ocurre en uno de los tanques de almacenamiento de LNG. Como no hay barreras ni diques en el área de los tanques de almacenamiento, se asume que la descarga fluye directamente hacia el agua sin pasar por ningún contenedor.

SUPOSICIONES:

- Dos de las tres bombas están normalmente en servicio (una sirve como repuesto)
- Cada bomba esta diseñada para entregar $675 \text{ m}^3/\text{H}$ (2970 gpm) a 6.55 bar (95 psig)
- El flujo en el tubo roto se asume como la razón de bombeo normal al tanque ósea de $1350 \text{ m}^3/\text{H}$ (5940 gpm)
- La cantidad derramada en el periodo de dos minutos es 45 m^3 y en el periodo de diez minutos es de 225 m^3
- La línea de descarga es una tubería de doble pared de 16 pulgadas de diámetro, situada a 24 metros del nivel del mar.

ESCENARIO 9: Falla de un brazo de descarga de LNG

Este caso asume una ruptura completa de un brazo de descarga de LNG de 20 pulgadas ubicado en la plataforma de descarga.

SUPOSICIONES:

- Los tres brazos de descarga están normalmente en servicio con un flujo máximo combinado de $16000 \text{ m}^3/\text{H}$ (70 445 gpm)
- El flujo en la línea rota es asumido como la tercera parte de la razón normal de bombeo desde el barco o $5333 \text{ m}^3/\text{H}$ (23480 gpm)
- La cantidad derramada durante el periodo de dos minutos es de 178 m^3 y durante el periodo de 10 minutos es de 889 m^3

ESCENARIO 10: Falla del cabezal de descarga de LNG

Este escenario considera una ruptura completa del cabezal de descarga de 24 pulgadas ubicada en la plataforma de regasificación.

SUPOSICIONES:

- El flujo en la línea rota se asume como la razón de bombeo de operación máxima del barco la cual es $16000 \text{ m}^3/\text{H}$ (70445 gpm)
- La cantidad derramada durante el periodo de dos minutos es de 533 m^3 y durante el periodo de diez minutos es de 2667 m^3 .

ESCENARIO 11: Falla en la línea de entrada al vaporizador de alta presión

En este caso, una ruptura total en la tubería de transferencia de 10 pulgadas en uno de los vaporizadores tipo open rack es asumida.

SUPOSICIONES:

- Cinco de los seis vaporizadores están normalmente en servicio (uno es utilizado como repuesto)
- Dos bombas de alta presión alimentan el LNG a cada vaporizador a la razón de flujo combinada de $400 \text{ m}^3/\text{H}$ ($200 \text{ m}^3/\text{H}$ cada una)
- La cantidad derramada durante el periodo de dos minutos es de 13 m^3 y durante el periodo de 10 minutos es de 67 m^3
- Las bombas están diseñadas para entregarle al vaporizador una presión de salida de 105 bares (1520 psig), la cual es asumida como la presión a la cual la tubería de transferencia falla.

ANEXO B. PELIGROS ASOCIADOS AL LNG

PELIGRO CRIOGÉNICO

Peligros criogénicos incluyen quemaduras criogénicas asociadas al congelamiento de la piel debido al contacto directo con el LNG (-260°F), gas frío, o superficies frías. Otro peligro importante asociado con todos los fluidos criogénicos es el impacto de las bajas temperaturas en el material del tanque de almacenamiento y en las estructuras de soporte. Por ejemplo, el acero al carbono pierde ductilidad y resistencia al impacto decrecen. Estas características de los materiales a bajas temperaturas requiere una cuidadosa selección, no solo para las áreas de proceso que normalmente están a temperaturas criogénicas, sino también aquellas áreas que podrían únicamente sujetas a temperaturas criogénicas en condiciones no planeadas o de accidente.

SOBREPRESURIZACIÓN

El potencial para una sobre presurización es un peligro reconocido en plantas que manejan gases refrigerados o licuados. Es a menudo posible aislar una vasija o una porción de una tubería cerrando las válvulas a ambos extremos de la vasija o la tubería que contiene una cantidad significativa del líquido criogénico. Si la temperatura del líquido se incrementa, por ejemplo, debido a la fuga de calor a través del aislamiento, el líquido se expandirá debido a que la temperatura se incrementa y se vaporizará. La generación de vapor causará que la presión dentro de la vasija o la tubería se incremente y pueda finalmente resultar en la ruptura de las mismas, particularmente si el equipo de seguridad protectorio (válvulas de alivio, etc.) no esta disponible.

LLAMARADA DE FUEGO EN UNA NUBE DE VAPOR (VAPOR CLOUD FLASH FIRE)

Para que los líquidos se quemen, primero deben transformarse en vapor. Si LNG se derrama de un contenedor, este se vaporizara fácilmente. Siempre que el LNG se derrama de un tanque de almacenamiento, el líquido va a ser calentado por los alrededores, esto causa que el líquido se vaporice. El vapor generado por este líquido evaporizándose empezara a mezclarse con el aire de los alrededores y será llevado en la dirección del viento, creando así una nube de vapor. Así como el vapor continua siendo llevado por el viento, este se mezclara con aire adicional y se diluirá más. Alguna porción de la nube de vapor estará entre los límites de flamabilidad (alrededor del 5-15% en volumen). Si esta porción inflamable encuentra una fuente de ignición, la nube de vapor podría encenderse. La flama entonces podría propagarse a través de la nube, y volver a la fuente del vapor, particularmente si la porción inflamable de la nube es continua.

Esta simple retro-ignición de una nube no confinada puede causar fuegos secundarios mediante la ignición de materiales en el camino de la flama y puede causar graves quemaduras a personas que se encuentren dentro de la nube. El daño al equipo de la planta será generalmente limitado, debido a que el tiempo de exposición al fuego resultara relativamente corto.

EXPLOSIÓN DE UNA NUBE DE VAPOR NO CONFINADA (UNCONFINED VAPOR CLOUD EXPLOSION UVCE)

El LNG presenta casi las mismas características que el gas natural. En áreas bien ventiladas, el gas natural quema con una velocidad baja y tiene una alta energía de ignición en comparación con otros hidrocarburos combustibles. Vapores de gas natural en áreas completamente abiertas no producirán explosión de nubes de vapor no confinadas (UVCE), las cuales prevalecen más en hidrocarburos de

cadena grandes. El que una nube de vapor se quema retornando a la fuente del vapor o causa una explosión, depende de muchos factores: la estructura química de las moléculas del vapor, el tamaño y la concentración de la nube de vapor, la fuerza de la fuente de ignición, y el grado de confinamiento de la nube de vapor. Las condiciones necesitadas para producir una explosión de una nube de vapor de gas natural no confinada no están generalmente presentes en una planta de LNG, por lo tanto tales explosiones no se consideran como un riesgo potencial.

EXPLOSIÓN EN ESPACIO CONFINADO (CONFINED SPACE EXPLOSION)

En áreas cerradas, la ignición de una mezcla inflamable de gas natural podría terminar en una explosión, resultando en daños por sobre presión. Si LNG o su vapor se escapa a un área cerrada (sala de control, sala de compresores, etc.), entonces la posibilidad de una explosión es marcadamente mayor. Esto es debido a que la presión se incrementa dentro de un área cerrada causado el calentamiento del aire por el fuego, y el incremento del volumen de gas durante la combustión. La mayoría de los edificios resistirán una pequeña presión interna y cuando el límite de presión se alcance, el edificio literalmente explota. El grado de confinación necesaria para producir un comportamiento de explosión es actualmente un tema de investigación, particularmente enfocado a condiciones bien confinadas en plantas costa afuera.

PISCINA DE FUEGO (POOL FIRE)

Una fuga de LNG de suficiente tamaño podría resultar en una acumulación de líquido en el suelo. Si se enciende, el fuego resultante es conocido como piscina de fuego. La ignición puede ocurrir exactamente en la piscina (inmediatamente o

con algún retraso), o la piscina puede ser encendida por el fuego de una nube de vapor. Objetos en contacto directo con la flama arriba de la piscina de fuego puede ser severamente dañados o destruidos, y el personal expuesto podría recibir grandes lesiones debido a quemaduras. Objetos y personal fuera del volumen de la flama puede también ser dañados o heridos por la radiación de calor emitida por la flama. Comparado al fuego de una nube de vapor, los efectos son mas localizados, pero de mayor duración.

FUEGO DE ANTORCHA (TORCH OR JET FIRE)

Cuando un líquido inflamable es accidentalmente derramado de un contenedor presurizado, la fuga podría tomar la forma de un spray de pequeñas gotas de líquido más vapor. Los fuegos de antorcha presentan el mismo tipo de peligros que las piscinas de fuego, por ejemplo, contacto directo con la flama y el calor radiante.

Sin embargo, el poder del calor radiante de un fuego de antorcha es a menudo más grande que el de una piscina de fuego de tamaño similar.

EXPLOSIÓN DE UN VAPOR EXPANDIÉNDOSE EN UN LÍQUIDO EVAPORÁNDOSE BLEVE (BOILING LIQUID EXPANDING VAPOR EXPLOSION)

Una BLEVE es la catastrófica falla de un contenedor presurizado cuando su contenido esta por encima de la temperatura del punto de ebullición. El tipo más común de BLEVE ocurre cuando una vasija presurizada no aislada es expuesta a un fuego adyacente. El fuego incrementa la presión interna y debilita la vasija hasta que esta no puede soportar más la presión. La vasija entonces se rompe violentamente, y partes de ella podrían ser propulsadas a grandes distancias. El líquido derramado se vaporiza y atomiza inmediatamente, a menudo resultando en

una gran bola de fuego. La bola de fuego puede causar un gran daño debido al contacto con las flamas y la radiación termal. A pesar de que la bola de fuego dura únicamente unos pocos segundos, su efecto puede ser devastador.

La probabilidad de una BLEVE en un tanque de almacenamiento de LNG es extremadamente pequeña; siempre y cuando el tanque principal este protegido por tanques externos y el aislamiento podrían prevenir la transferencia de calor desde el fuego hacia el tanque principal. Además, la mayoría de los tanques de almacenamiento de LNG están diseñados para una presión de operación relativamente baja. Por lo tanto, si es expuesto a fuego, estos tanques no producirán una BLEVE desde que ellos fallen a baja presión interna y, al tiempo de la falla, el LNG podría no estar lo suficientemente caliente como para causar que alguna cantidad significativa de líquido se vaporice.

ROLLOVER (Revolver)

EL LNG es principalmente una mezcla de metano e hidrocarburos mas pesados. El transporte del LNG a través del océano puede producir un cambio en la densidad del LNG. La adición de una nueva carga de LNG podría estratificarse dentro del tanque de almacenamiento, a menos que los procedimientos de mezcla sean los adecuados. Después de un periodo, la capa estratificada podría igualarse en densidad con capas superiores y repentinamente “rollover” a la superficie del tanque. Este tipo de vaporización repentina puede causar sobre presurización en el tanque.

ANEXO C. UNA PEQUEÑA HISTORIA DE LOS INCIDENTES CON LNG

Si bien las primeras patentes en LNG datan de 1880, la primera planta comercial fue construida en West Virginia en 1939.

Siguiendo el accidente catastrófico de 1944 descrito a continuación, la industria emergente del LNG se detuvo. Durante finales de los 60's, las compañías de gas experimentaron escasez durante periodos de frío severo. Entre los años de mediados de los 60's y los 70's más de 50 plantas de LNG fueron construidas en los Estados Unidos. Hoy en día existen cerca de 100 plantas de LNG, pero no todas las plantas son operacionales.

East Ohio Gas LNG tank, Cleveland, 1944

La segunda planta comercial de LNG fue construida en Cleveland en 1941 por la compañía de gas del este Ohio. Esta planta operó sin incidentes desde 1941 hasta 1944, cuando se decidió adicionar un nuevo y muy grande tanque de almacenamiento.

El acero inoxidable fue escaso durante la segunda guerra mundial. El nuevo tanque fue construido con un acero de bajo (3%) contenido de níquel. El tanque fue puesto en servicio y eventualmente falló catastróficamente al contacto con LNG criogénico, derramando su contenido a las calles. El LNG entró al sistema de alcantarillado, y el fuego que se ocasionó se esparció por una gran área, eventualmente matando 130 personas y causando daños a 30 acres alrededor de la planta.

Texas Eastern Transmission LNG Tank, Staten Island, 1973

El techo de un tanque de colapso. Un tanque de LNG de la planta de la compañía Texas Eastern Transmission, el cual había estado en servicio alrededor tres años, fue puesto fuera de servicio para realizar una reparación interna. El tanque fue

calentado un poco, se purgaron los gases remanentes con nitrógeno inerte y fue puesto bajo aire fresco recirculante. Una cuadrilla de obreros instaló el tanque en abril de 1972. Diez meses después, en febrero de 1973, el aislamiento de espuma de poliuretano dentro del tanque fue accidentalmente prendido. El rápido aumento de la temperatura causó un correspondiente aumento en la presión. El incremento en la presión fue demasiado rápido que hizo que el domo de concreto se levantara y al caer hizo colapsar el tanque matando a 43 operarios.

ROLLOVER EN UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE LNG, LA SPEZIA, ITALY 1971

El 21 de Agosto de 1971, Un tanque de almacenamiento exhibió una significativa sobre presurización. Este fenómeno fue atribuido a la estratificación de la última carga de LNG (con diferente densidad que el contenido original del tanque) y una posterior “rollover” seguido de calentamiento de las capas estratificada. No fueron reportados heridos, no obstante una nube de vapor significativa fue observada.

ARZEB, ALGERIA 1974

El cambio de una válvula por una hecha de una aleación inadecuada falló al contacto con las temperaturas criogénicas. Muchos trabajadores resultaron seriamente heridos por las quemaduras criogénicas mientras trataban de aislar la fuga. La fuga no se encendió.

COLUMBIA GAS LNG TERMINAL, COVE POINT, MARYLAND 1979

Esta planta empezó a operar a inicios de 1978. Para Octubre de 1979, la planta había descargado alrededor de 80 barcos con LNG. Alrededor de las 3 de la madrugada en octubre 6, 1979, una explosión ocurrió dentro de una subestación eléctrica de Cove Point.

El LNG se fugó a través de una bomba de sello eléctrico inadecuadamente ajustada. El LNG entonces se vaporizó, pasando a través de 200 pies de conductos eléctricos bajo tierra, y entró a la subestación. Como nunca se esperó que el gas natural entrara a este edificio, no había detectores de gas instalados en este edificio. La mezcla de gas-aire fue encendida por la chispa resultante del accionamiento de un interruptor, resultando en explosión. Esta explosión mató un operador en el edificio, hiriendo seriamente a otro y causando daños de varios millones de dólares. Este fue un accidente aislado causado por un muy específico arreglo de circunstancias. El consejo Nacional de seguridad en transportación encontró que este Terminal estaba diseñado y construido en concordancia con todas las regulaciones y códigos. Antes de que el Terminal de Cove Point fuera puesto en operación otra vez después del accidente, todos los sistemas de sellamiento de las válvulas fueron cambiadas y se agregaron detectores de gas a todos los edificios.

EXPLOSIÓN DE UN BUS QUE OPERABA CON LNG, 1992

Una explosión de metano ocurrió dentro de un vehículo que utilizaba LNG como combustible en diciembre 6 de 1992. El vehículo, un bus articulado de 60 pies había apenas sido entregado y estaba siendo preparado para la operación con LNG. El representante del fabricante estaba reparando una gotera en el sistema de combustible gas natural cuando un detector de gas combustible localizado a bordo del vehículo sonó la alarma. A pesar de que se suponía que tal reparación debía realizarse al aire libre, el inclemente tiempo hizo que la reparación se llevara a cabo en un garaje normal. Después del aviso de fuga, el mecánico usó el interruptor para anular la alarma para encender el bus y así llevarlo afuera. Sin embargo, cuando el bus se encendió, un relevador en el sistema de aire acondicionado encendió la mezcla de metano-aire que se había acumulado en el interior del bus. La explosión resultante voló todas las ventanas del bus así como también la escotilla del techo.

ANEXO D. REGULACIÓN DEL LNG

Con el crecimiento de la industria del LNG a principios de los 60's, los temas de seguridad para el LNG empezaron a ser reconocidos. El potencial de daño de una gran área debido a una fuga significativa de LNG y la revisión del desastre de 1944 en Cleveland empezaron un movimiento en la industria para desarrollar estándares especial para seguridad en el manejo del LNG.

National Fire Protection Agency (NFPA 59A) Agencia Nacional para la proteccion al fuego

El departamento de transporte (DOT) y la comisión Federal para la regulación de la Energía (FERC) son responsables por la regulación de las plantas de LNG dentro de la costa. El departamento de transporte (DOT) esta a cargo de los estándares mínimos de seguridad para la ubicación, el diseño, la construcción y la operación de las plantas de LNG.

La comisión Federal para la regulación de la energía implemento su autoridad sobre los terminales de LNG a través de su regulación 18 CFR 153. Los requisitos hechos por FERC incluyen detallada ingeniería de ubicación y diseño, evidencia de que la planta va a recibir y entregar seguramente el LNG, y una delimitacion para la localización de los terminales propuestos. Esta regulación incorpora una estándar de referencia de la National Fire Protection Association (NFPA), la cual requiere zonas de exclusión térmicas y de dispersión alrededor del Terminal de LNG.

ANEXO E. FRECUENCIAS ESTIMADAS PARA CADA ESCENARIO

NOTA: Las frecuencias para los eventos 1 al 6 no fueron calculadas ya que no hacen parte de la cuantificación del riesgo.

FRECUENCIA DEL EVENTO 7

Las frecuencias asociadas con la falla catastrófica del techo del tanque están resumidas a continuación:

Falla del techo: 2.00E-06 por año (2/1 000 000 por año)

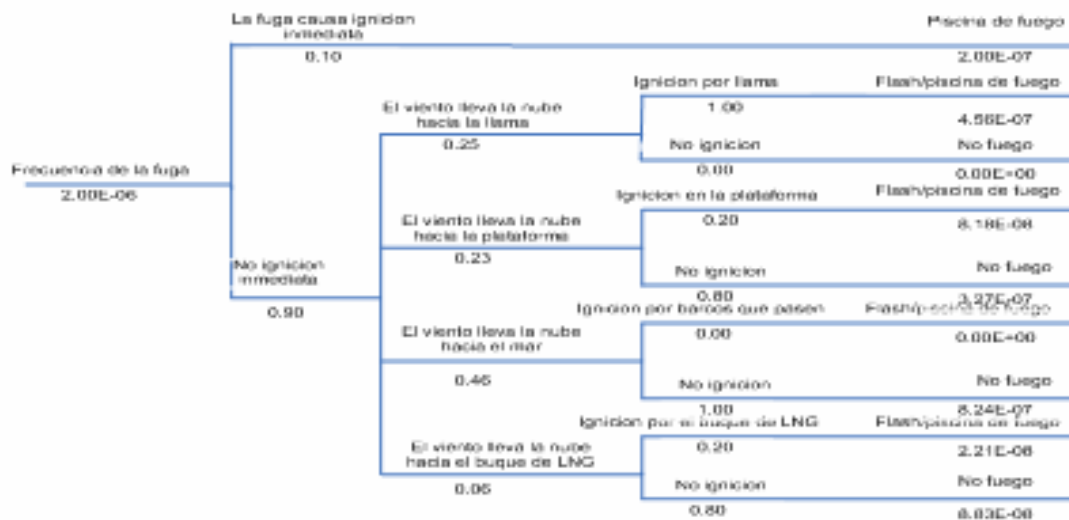
Ignición inmediata y piscina de fuego: 2.00E-07 por año (2/10 000 000 por año)

Dispersión Y flash/piscina de fuego: 5.60E-07 por año (5.6/10 000 000 por año)

Dispersión sin ignición: 1.24E-06 por año (1.24/1 000 000 por año)

El árbol de eventos usado para generar estas frecuencias es mostrado en la siguiente figura:

Figura E1: Escenario 1 – Árbol de eventos para una fuga sin mitigar



FRECUENCIA DEL EVENTO 8

Las frecuencias asociadas a una ruptura completa de la línea de descarga de un tanque de LNG esta resumida a continuación:

Falla de la tubería y fuga: 3.94E-05 por año (3.94/100 000 por año)

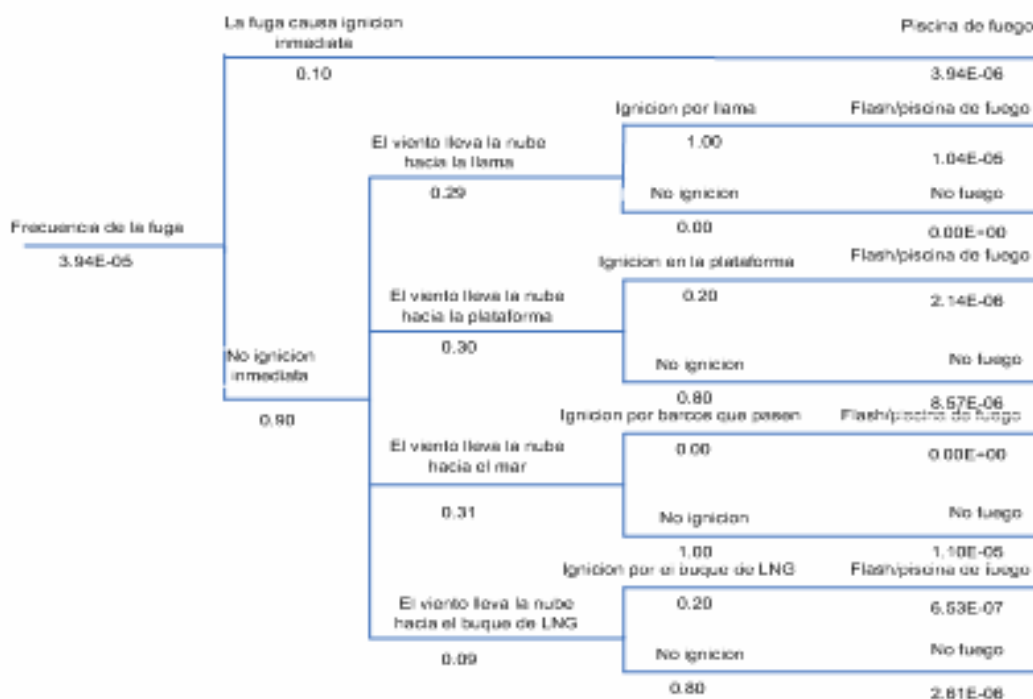
Ignición inmediata y piscina de fuego: 3.94E-06 por año (3.94/1 000 000 por año)

Dispersión y flash/piscina de fuego: 1.32E-05 por año (1.32/100 000 por año)

Dispersión sin ignición: 2.22E-05 por año (2.22/100 000 por año)

El árbol de eventos usado para generar estas frecuencias es mostrado en la siguiente figura:

Figura E2: Escenario 2 – Árbol de eventos para una fuga sin mitigar



FRECUENCIA DEL EVENTO 9

Las frecuencias asociadas a una ruptura completa de un brazo de descarga del LNG es resumido a continuación:

Falla de la tubería y fuga: $7.99E-03$ por año (7.99/1 000 por año)

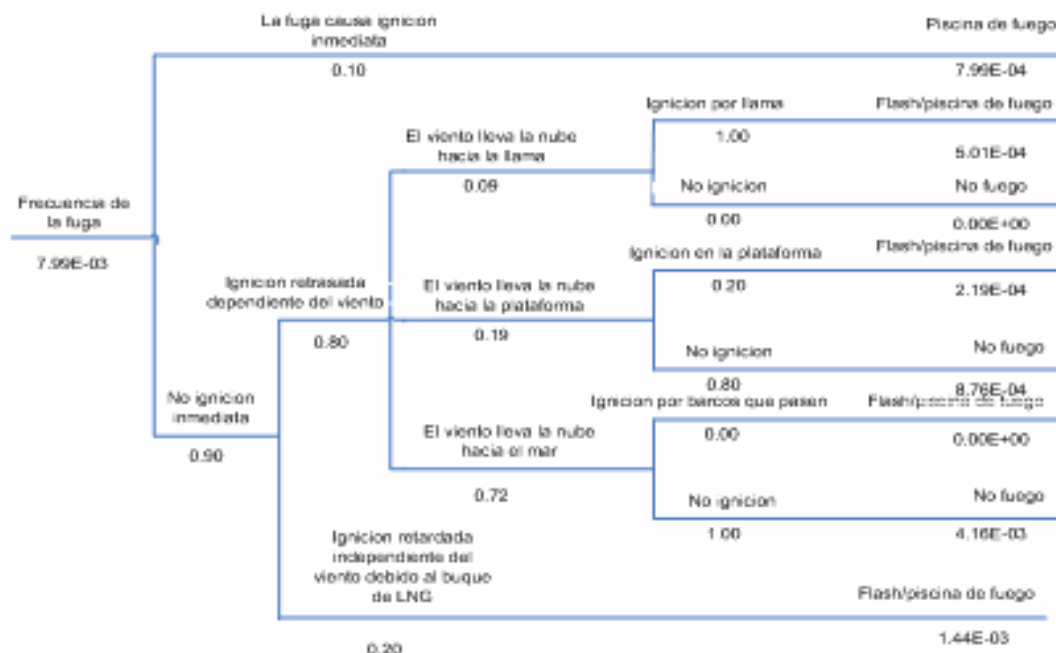
Ignición inmediata y piscina de fuego: $7.99E-04$ por año (7.99/10 000 por año)

Dispersión y flash/piscina de fuego: $2.16E-03$ por año (2.16/1,000 por año)

Dispersión sin ignición: $5.03E-03$ por año (5.03/1,000 por año)

El árbol de eventos usado para generar estas frecuencias es mostrado en la siguiente figura:

Figura E3: Escenario 3 – Árbol de eventos para una fuga sin mitigar



FRECUENCIA DEL EVENTO 10

Las frecuencias asociadas a una ruptura completa de un cabezal de descarga de LNG en la plataforma de regasificación es resumido a continuación:

Falla de la tubería y fuga: 2.66E-05 por año (2.66/100 000 por año)

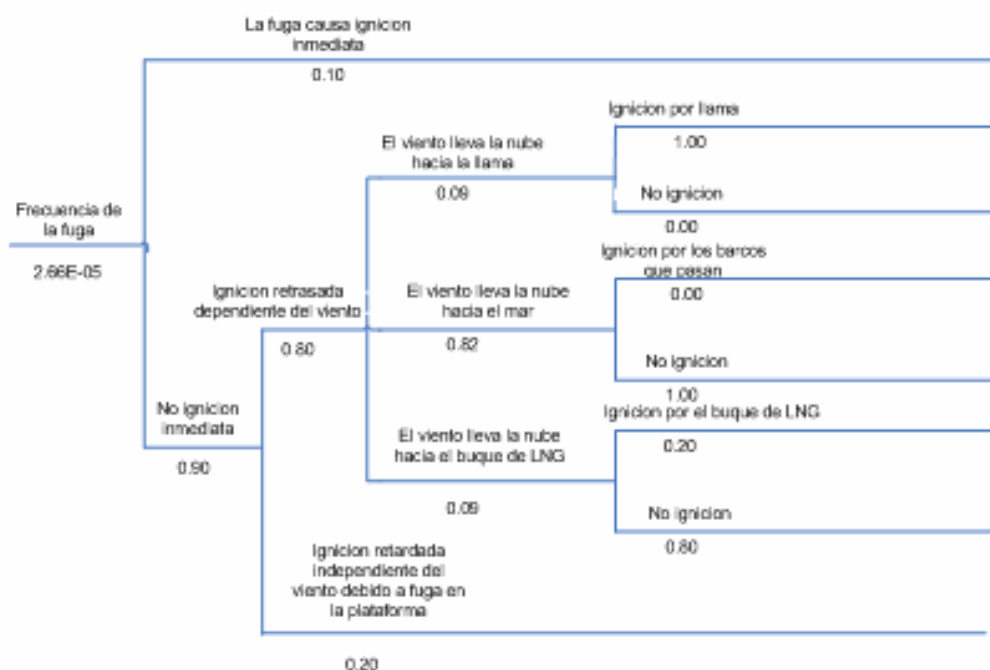
Ignición inmediata y piscina de fuego: 2.66E-06 por año (2.66/1 000 000 por año)

Dispersión y flash/piscina de fuego: 6.81E-06 por año (6.81/1 000 000 por año)

Dispersión sin ignición: 1.71E-05 por año (1.71/100,000 por año)

El árbol de eventos usado para generar estas frecuencias es mostrado en la siguiente figura:

Figura E4: Escenario 4 – Árbol de eventos para una fuga sin mitigar



FRECUENCIA DEL EVENTO 11

Las frecuencias asociadas a una ruptura completa de la línea de alimentación de LNG al vaporizador tipo open Rack son resumidas a continuación:

Falla de la tubería y fuga: $7.55E-04$ por año ($7.55/10\ 000$ por año)

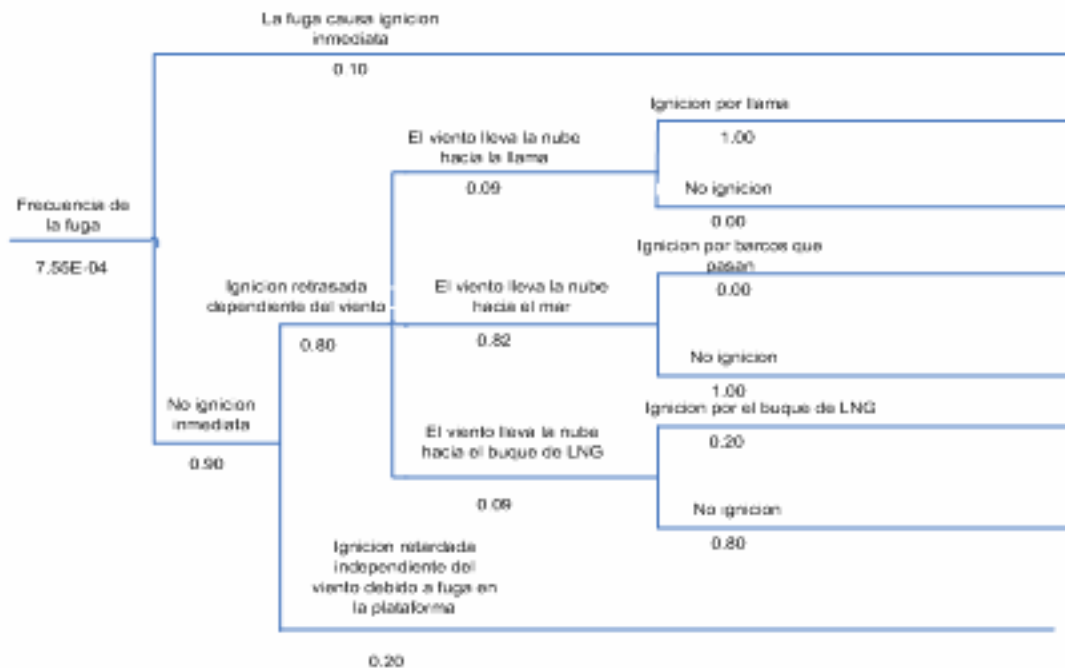
Ignición inmediata y piscina de fuego: $7.55E-05$ por año ($7.55/100\ 000$ por año)

Dispersión y flash/piscina de fuego: $1.93E-04$ por año ($1.93/10\ 000$ por año)

Dispersión sin ignición: $4.86E-04$ por año ($4.86/10\ 000$ por año)

El árbol de eventos usado para generar estas frecuencias es mostrado en la siguiente figura:

Figura E5: Escenario 5 – Árbol de eventos para una fuga sin mitigar



ANEXO F. COMPARACION DE LOS SOFTWARE UTILIZADOS EN EL ANALISIS DE CONSECUENCIAS (CANARY Y DEGADIS)

Los modelos utilizados por Canary y Degadis son similares en:

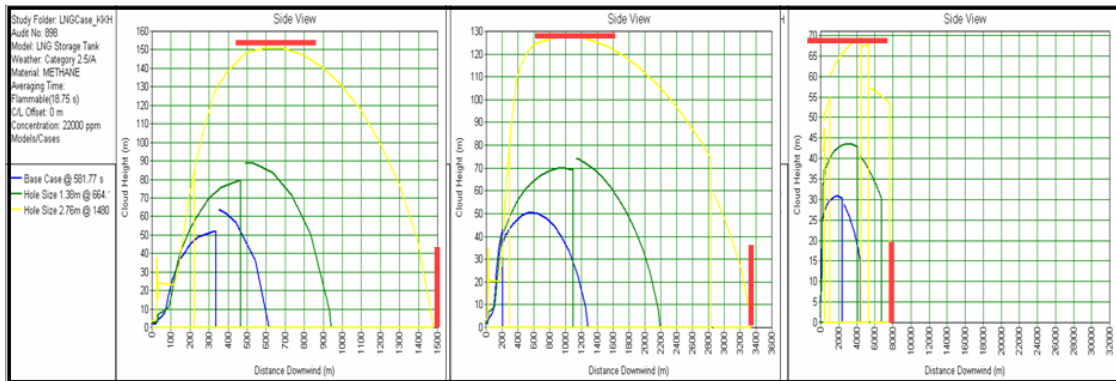
- Ambos simulan las fugas de LNG sobre agua de la misma manera, primero un modelo de descarga, seguido de un modelo de expansión de la piscina y finalmente un modelo de evaporación.
- Ambos usan un modulo de régimen de gas pesado que gradualmente va cambiando a un modelo de régimen pasivo.

Los modelos difieren principalmente en:

- El modelo utilizado por Canary esta totalmente integrado con un modulo de descarga de un liquido flash, un modulo para el jet fire, un modulo para la trayectoria de la gota, un modulo para la expansión y evaporación de la piscina, y otros módulos para fuegos y explosiones. En los datos de salida grafica la vista lateral y superior para jet fires y múltiples ángulos para el caso de la evaporación de la piscina.
- El modelo de Degadis no esta integrado con la funcionalidad descrita anteriormente. Degadis posee un modelo para el jet fire, pero este modelo esta limitado para fugas verticales y no provee vistas laterales ni superiores de las plumas de dispersión.

ANEXO G. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES UTILIZANDO PHAST®

Figura G1. Vista lateral de dispersión para diámetros de hoyo de 0.08m, 1.38m, y 2.76m y condiciones climáticas: velocidad del viento 2.5m/s estabilidad atmosférica A/C/F para concentración de 22,000ppm



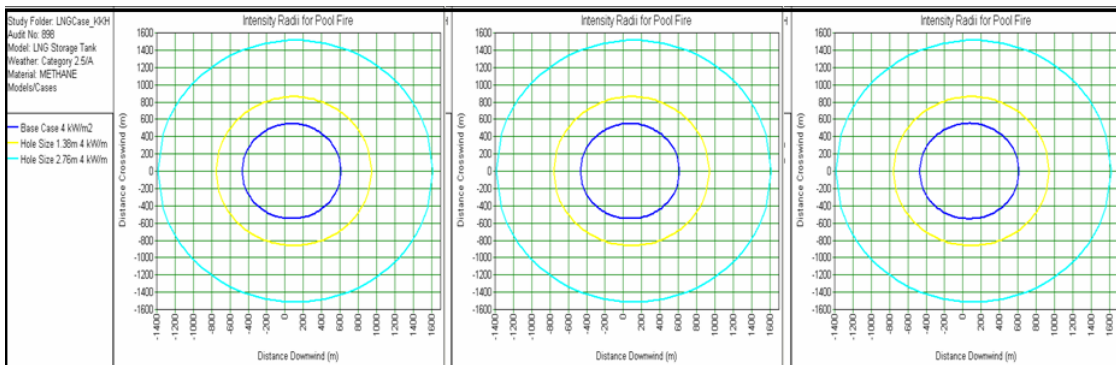
Estabilidad ·
 Atmosferica ·

A

C

F

Figura G2. Radio de intensidad de una piscina de fuego con diámetros de hoyo de: 0.08m, 1.38m y 2.76m y condiciones climáticas: velocidad del viento 2.5m/s estabilidad atmosférica A/C/F para 4kW/m2



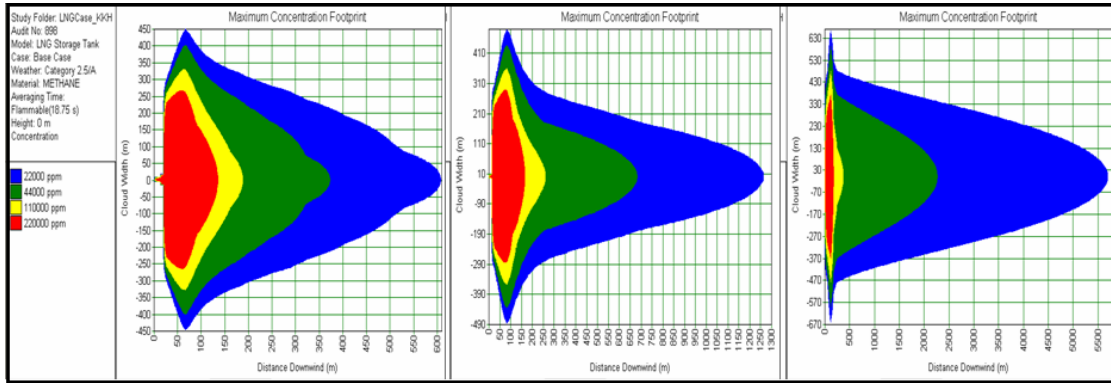
Estabilidad ·
 Atmosferica ·

A

C

F

Figura G3. Concentración máxima para hoyo de diámetro 0.80m y condiciones climáticas: velocidad del viento 2.5m/s estabilidad atmosférica A/C/F para concentraciones de 22,000ppm, 44,000ppm, 110,000ppm, y 220,000ppm



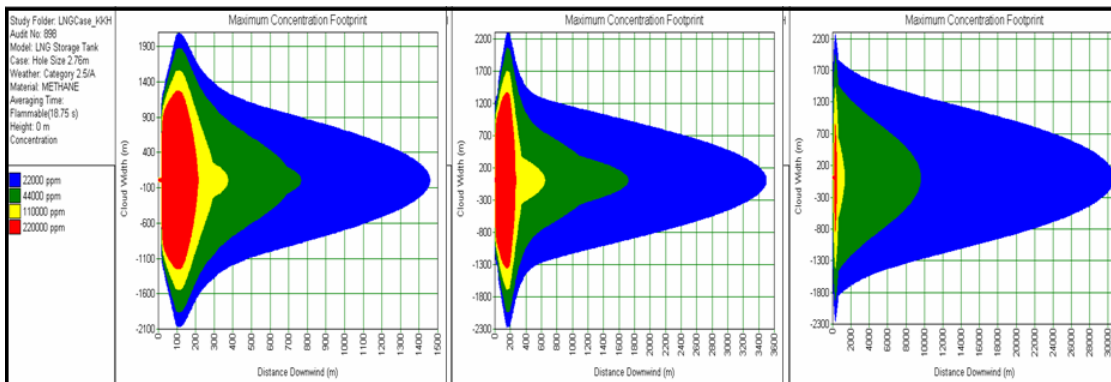
Estabilidad ·
 Atmosferica ·

A

C

F

Figura G4. Concentración máxima para hoyo de diámetro 2.76m y condiciones climáticas: velocidad del viento 2.5m/s estabilidad atmosférica A/C/F para concentraciones de 22,000ppm, 44,000ppm, 110,000ppm, y 220,000ppm



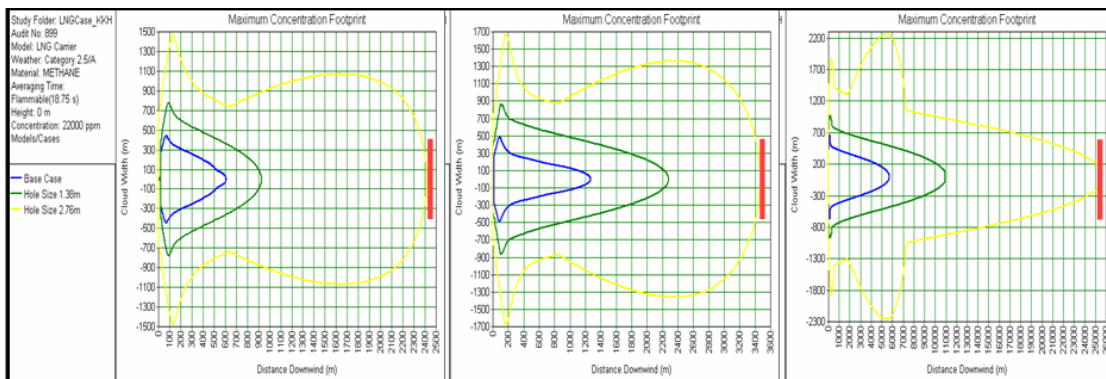
Estabilidad ·
 Atmosferica ·

A

C

F

Figura G5. Dispersión en la dirección del viento para un agujero de diámetros 0.08m, 1.38m y 2.76m y condiciones climatológicas: velocidad del viento 2.5m/s, estabilidad atmosférica A/C/F para concentración de 22,000ppm en el buque de LNG



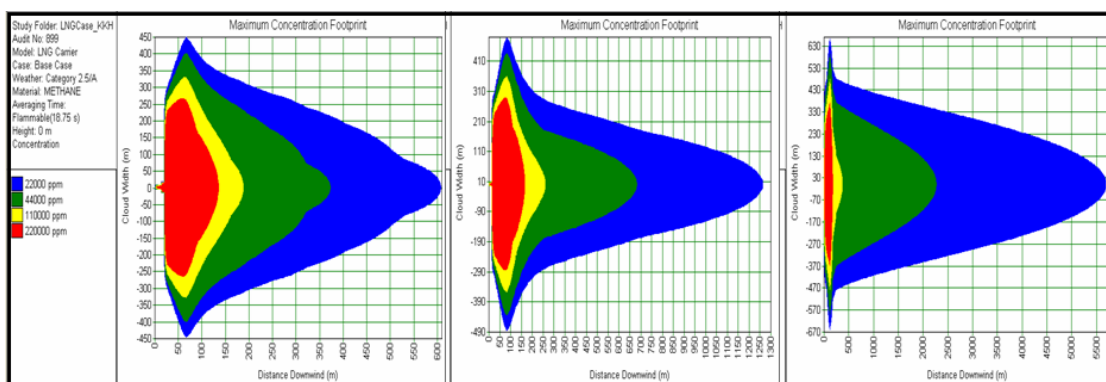
Estabilidad ·
Atmosferica ·

A

C

F

Figura G6. Concentración máxima para hoyo de diámetro 0.80m y condiciones climáticas: velocidad del viento 2.5m/s estabilidad atmosférica A/C/F para concentraciones de 22,000ppm, 44,000ppm, 110,000ppm, y 220,000ppm en el buque de LNG



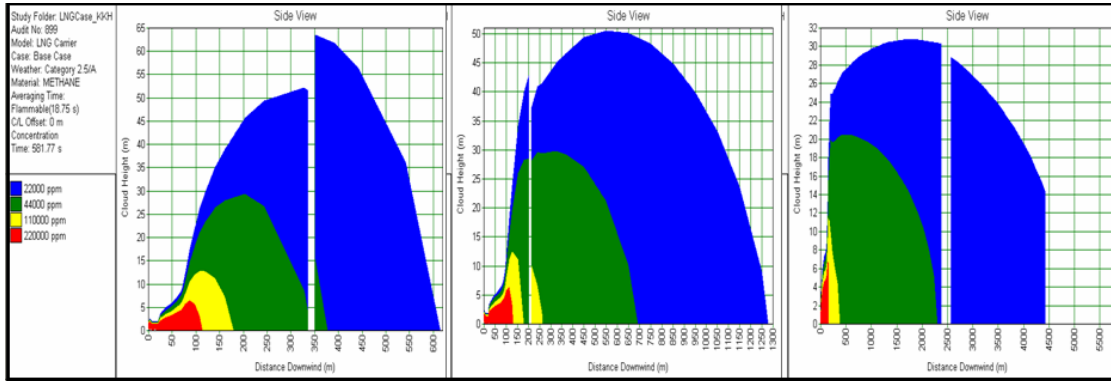
Estabilidad ·
Atmosferica ·

A

C

F

Figura G7. Vista lateral de dispersión para hoyo de diámetro de 0.08m y condiciones climáticas: velocidad del viento 2.5m/s estabilidad atmosférica A/C/F para concentración de 22,000ppm a 220,000ppm en el buque de LNG



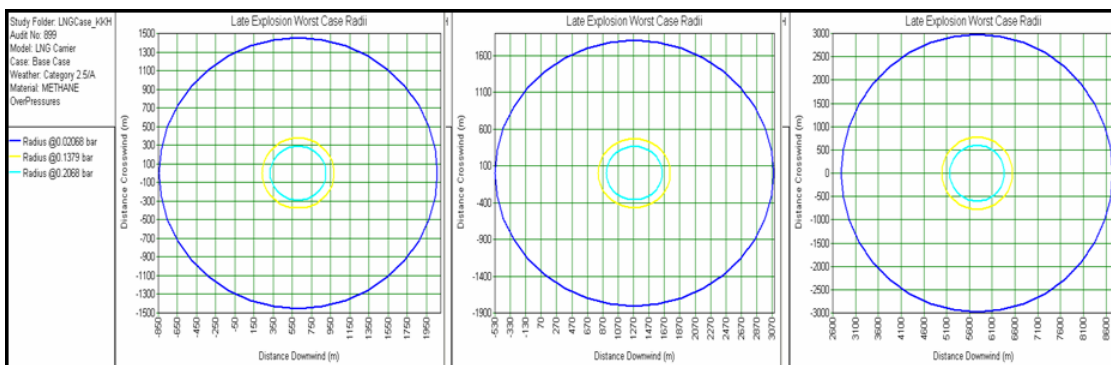
Estabilidad •
Atmosferica •

A

C

F

Figura G8. Radio de sobre presión de explosión tardía para hoyo de diámetro 0.80m y condiciones climáticas: velocidad del viento 2.5m/s estabilidad atmosférica A/C/F para 0.02068bar, 0.1379bar, y 0.2068bar en el buque de LNG



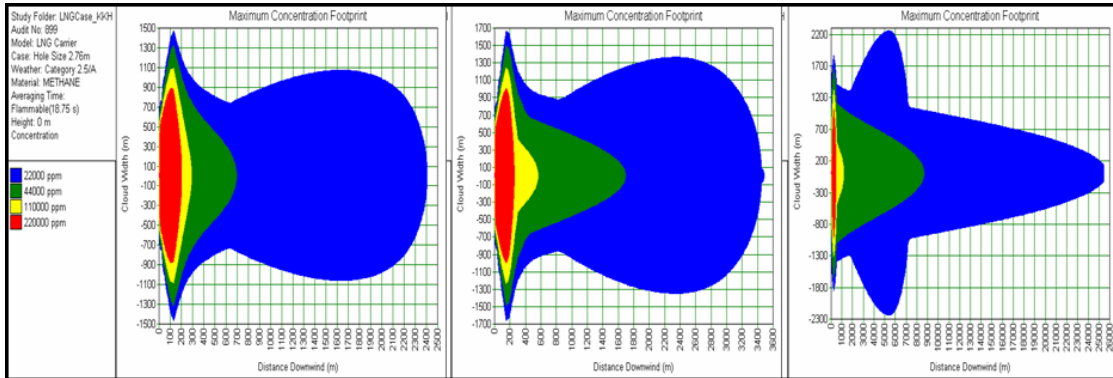
Estabilidad •
Atmosferica •

A

C

F

Figura G9. Concentración para hoyo de diámetro 2.76m y condiciones climáticas: velocidad del viento 2.5m/s estabilidad atmosférica A/C/F para concentraciones de 22,000ppm, 44,000ppm, 110,000ppm, y 220,000ppm en el buque de LNG



Estabilidad •
 Atmosferica •

A

C

F

ANEXO H. SOFTWARE UTILIZADO PARA EL ANALISIS DE CONSECUENCIAS

El código de regulaciones federal (Título 49 parte 193, abreviado como 49 CFR 193) define estándares en cuanto a la seguridad para las plantas de Gas Natural Licuado (LNG) cubierto por las leyes federales de seguridad en líneas de tubería.

El código menciona la protección en la vecindad de los sistemas de almacenamiento y transferencia del LNG, especificando los métodos usados para calcular las zonas afectadas térmicamente y por la dispersión del LNG. Los modelos especificados son LNGFIRE3 para calcular la protección a la radiación térmica y DEGADIS (Dense Gas Dispersión) para calcular la dispersión de LNG.

Aunque comercialmente existen un gran número de otros programas para calcular la dispersión Gas Natural Licuado, entre ellos se encuentran CANARY, SOURCE5, ALOHA, PHAST y SLAB, también existe otro tipo de programas más refinados y que requieren de mayor tiempo de cómputo como lo son los Computacional Fluids Dynamics (CFD).

Para este proyecto se utilizarán los programas requeridos por la regulación de los Estados Unidos (DEGADIS y LNGFIRE3) para el análisis de consecuencias, además de dos programas que utilizan interfaz gráfica con el usuario, estos son: PHAST y CANARY.

LNGFIRE3:

LNGFIRE3 calcula las zonas de exclusión térmica rodeadas por fuegos de LNG y ha sido validado a través de experimentos a larga escala. Además determina los 4 niveles de flux de radiación especificados en 49 CFR 193. La velocidad del viento, humedad relativa y la temperatura del ambiente así como parámetros que describan la fuente del LNG son especificados a través de una serie de ventanas de diálogo. El modelo asume que la flama toma la forma de un cilindro o un paralelepípedo, dependiendo del área que encierra el combustible. Resultados simples (distancia y flux) aparecen en pantalla como en la figura 3.

Figura H1. Resultados típicos usando LNGFIRE3

The screenshot shows the LNGFIRE3 software interface. At the top, the window title is 'C:\DOCUME-1\DALLBA-1\Desktop\LNG\LNGFIRE\Lngfire3.exe'. The main display area is divided into several sections:

- Input Parameters:**
 - Pool diameter (m): 50
 - Flame base height (m): 10
 - Target height (m): 0
 - Wind speed (m/s): 5
 - Ambient temperature (C): 30
 - Relative humidity (%): 50
- Model and Results:**
 - LNGFIRE Model Results
- Federal Code Results:**

Thermal flux (kW/m ²)	Distances from center of pool (m)
31.5	80.48
21.1	100.90
12.6	127.90
5.05	185.74

At the bottom of the window, a prompt asks: 'Do you want these results written to an output file (Y/N)?'

DEGADIS (Dense Gas Dispersión)

Las regulaciones federales que gobiernan la protección para la dispersión del LNG (49 CFR 193) especifican a DEGADIS como una medida aceptable para determinar las distancias de dispersión de mezclas vapor-gas inflamable.

El programa fue originalmente desarrollado por la Guardia Costera de los Estados Unidos y el Gas research Institute (GRI) con el objetivo primario de simular la dispersión de gases criogénicos inflamables. Trabajos subsecuentes auspiciados por la U.S Enviromental Agency (EPA) permitieron la simulación de dispersión Jet vertical.

Los perfiles del gas natural licuado predichos usando DEGADIS son consistentes con las pruebas de campo llevadas a cabo por el Department Of Energy (DOE) y SHELL U.K Ltd.

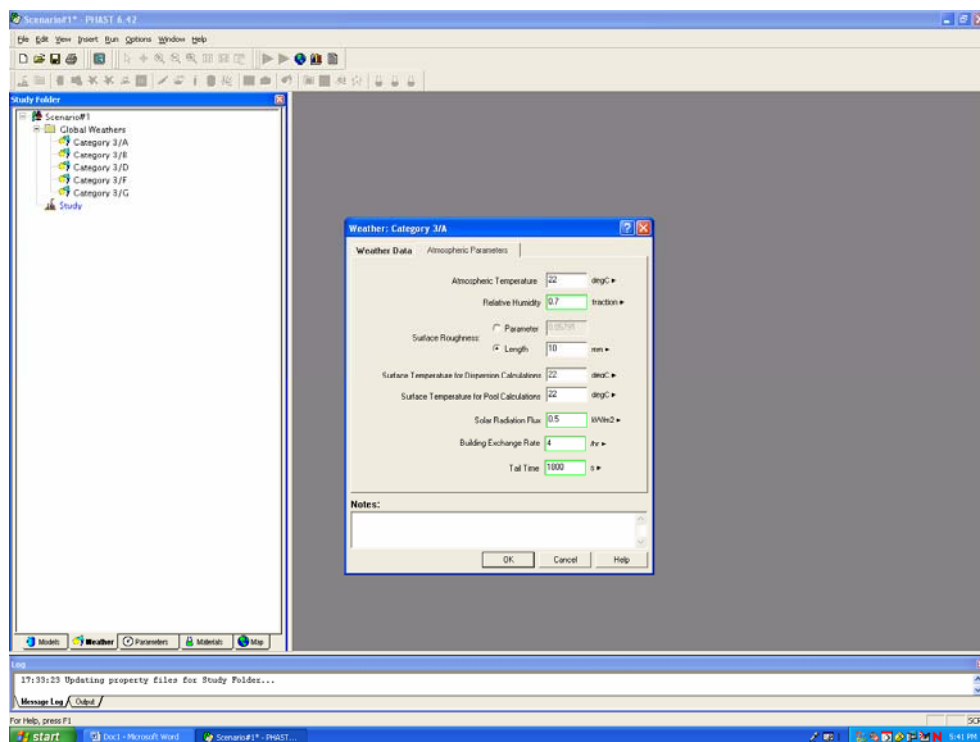
Al igual que LNGFIRE3, DEGADIS opera a través de una serie de ventanas de dialogo, con la información que el usuario proporciona acerca de condiciones locales y de la fuga de LNG.

PHAST:

PHAST es un software que utiliza interfaz grafica con el usuario como se puede observar en la figura 4, este software utiliza un modelo de dispersión denominado The Unified Dispersión Model (UDM), el cual simula fugas al nivel del suelo o a la altura deseada, además de fugas presurizadas o despresurizadas. Esta disponible la simulación de fugas continuas, instantáneas, de duración constante finita, y variables con el tiempo.

El modelo calcula la distribución de fases y la temperatura en la nube usando modelos termodinámicos de No-equilibrio, de equilibrio No-reactivo, o un modelo de equilibrio.

Figura H2. Interfase grafica con el usuario (GUI) usada por PHAST



CANARY:

Este software al igual que PHAST utiliza una interfaz grafica con el usuario, y esta construido a partir de otros modelos, por ejemplo utiliza un modelo modificado de DEGADIS para simular los Jet Fires, y un modelo modificado de SLAB para la dispersión de las nubes de vapor.