

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTABLECIMIENTO DE CRITERIOS INGENIERILES EN LA DETERMINACIÓN DE TASAS DE FUGAS Y SELECCIÓN DE PARÁMETROS EN EL CÁLCULO DE CONSECUENCIAS DE UNA EXPLOSIÓN POR NUBE DE VAPOR

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Daniel Guarate Duarte
Para optar al Título
de Ingeniero Químico.

Caracas, Noviembre 2012

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTABLECIMIENTO DE CRITERIOS INGENIERILES EN LA DETERMINACIÓN DE TASAS DE FUGAS Y SELECCIÓN DE PARÁMETROS EN EL CÁLCULO DE CONSECUENCIAS DE UNA EXPLOSIÓN POR NUBE DE VAPOR

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Nelson Mata.

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Andrés Rosales.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Daniel Guarate Duarte
Para optar al Título
de Ingeniero Químico.

Caracas, Noviembre 2012

Caracas, Noviembre 2012

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el Concejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Daniel Guarate Duarte., titulado

“ESTABLECIMIENTO DE CRITERIOS INGENIERILES EN LA DETERMINACIÓN DE TASAS DE FUGAS Y SELECCIÓN DE PARÁMETROS EN EL CÁLCULO DE CONSECUENCIAS DE UNA EXPLOSIÓN POR NUBE DE VAPOR”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al título de Ingeniero Químico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO

Prof. Leonardo Oropeza
Jurado

Ing. Jimmy Jardie
Jurado

Ing. Nelson Mata
Tutor Industrial

Prof. Andrés Rosales
Tutor Académico

DEDICATORIA

A Dios.

Por haberme permitido llegar hasta este punto y darme salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mis Padres.

Por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo, especialmente mi madre Omelia Duarte, por estar siempre allí, por enseñarme a luchar a pesar de las dificultades y carencias, por los valores inculcados que me han permitido ser una persona de bien, pero más que nada por su amor.

A mis hermanos.

Ana, Celestino, Daniela y Dariana para que tengan presente que el estudio es un instrumento de superación y que hay que soñar en alto pero con los pies en la tierra.

A mis amigos.

Que estuvieron siempre en esos momentos difíciles y me tendieron una mano amiga, que me acompañaron en mis logros y fracasos, que celebraron mis alegrías y que jamás me juzgaron en mis errores especialmente: Libia, Julián, Elías, Adriana, Emmanuel, María Alejandra, José, Karen, Lurif, Manuel, Daniel Solaque, Anahym, Carolina, Mafer, Vanessa Belisario, Dalia, Yajaira, Sra Rosa, Sra. Margot, Aura Barreto, Marines, Angélica, Graciélita, Carlos, Morantes, Robert, Dy Yango.

A mi tutores Andrés Rosales y Nelson Mata.

Por su gran apoyo, motivación y dedicación para la culminación de este trabajo.

A mis Profesores.

Aquellos que marcaron cada etapa de mi formación, y que sirvieron de ejemplos a seguir por su constancia, humildad y honestidad y que me dieron las herramientas para ser un profesional exitoso y comprometido con la sociedad, entre ellos: Mayela Boggiano, Rosalía de Merlo, Ernestina López, Antonieta Di Fronzo, Mina, Mariluz Alonso, Humberto Khum, Lebjulet, Chuchu, Mariemma, Gladys Bruzual, José Luis Quintero, Angela Hernández, Nelson Mata, Rafael Martín, María Alejandra Rodríguez, Johliny Casanova.

Por todo esto y más los quiero y valoro.

Daniel Guarate Duarte.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Ilustre Universidad Central de Venezuela, por brindarme la oportunidad de formarme como Ingeniero Químico, y por el apoyo brindado a lo largo de toda la carrera.

Agradezco a mi mamá por darme la vida, amarme mucho, creer en mí y porque siempre me apoyaste. Mamá gracias por darme una carrera para mi futuro, todo esto te lo debo a ti.

Agradezco a mis hermanos Ana, Trino, Dariana, y Daniela, por estar conmigo y apoyarme siempre, los quiero mucho.

Agradezco al personal de MCL Control y PDVSA, por prestarme todo el apoyo técnico y material necesario para el desarrollo de este trabajo especial de grado, especialmente: David Oñate, Jimmy Jarufe, Jenny Valdirio, Miguel Carreira.

Agradezco a mis tutores Andrés Rosales y Nelson Mata por el apoyo y motivación prestada en el desarrollo de este trabajo especial de grado.

Agradezco a mis compañeros de trabajo del Liceo “Esteban Gil Borges”: María Alejandra, José, Rosina, María Zenaida, Yépez, Antonieta, Ercilia, Anneris, Virginia, Pacheco, Araque, Mariana, Belkis Bolívar, Victoria, Luis Briceño, Cristina por el apoyo y conocimiento brindado en el área docente y por estar allí cuando más lo necesitaba.

Agradezco a mi gran amiga Libia y Yajaira palma por estar allí incondicionalmente, las quiero mucho.

Agradezco al personal del Departamento de Matemáticas de la Facultad de Ingeniería U.C.V por la formación brindada en el área de las matemáticas y prestarme su apoyo en todo momento, especialmente: Antonieta Di Fronzo, Chuchu, Mariemma Sánchez, José Luis Quintero, Luis Navarro, Gladys Bruzual, Nelson Fernández, Angela Tocco, María Luisa Vona, Anahym, Antonio Acosta a todos ustedes se les aprecia.

Agradezco Rosalba, María Alejandra, Adriana González, por las asesorías brindadas en el área de metodología que me sirvieron de gran ayuda y que dejaron un aprendizaje en mi persona.

Agradezco a todos mis alumnos de la Universidad Central de Venezuela y del Liceo “Esteban Gil Borges” por las muestras de afecto y cariño a lo largo de todos estos años y porque también de ustedes aprendí.

Agradezco a mis profesores por su gran apoyo y motivación, por el conocimiento brindado y los valores inculcados que permitieron que creciera no solo profesionalmente sino como persona, gracias a todos ustedes especialmente: Mayela Boggiano, Rosalía de Merlo, Antonieta Di Fronzo, Andrés Rosales, Mariluz Alonso, Mina Vivas, Marisol Menecia, Alcira Alfonzo, Humberto Khum.

Agradezco a Karlhys Gragirena por las asesorías brindada y que sirvieron de gran ayuda en el desarrollo de este trabajo.

Finalmente, pero no menos importante agradezco a todos esos amigos que siempre han estado profesional y personalmente, en las buenas y en las malas, para hacer de este recorrido una gran experiencia llena de aprendizaje y anécdotas, y que siempre estuvieron en esos momentos cuando más lo necesitaba apoyándome y motivándome enseñándome que más vale un hombre que cae y se levanta que aquel que nunca ha caído y que la felicidad no está en el destino sino en el camino, cuyos nombres son: Julián Soto, Emmanuel de Sousa, Dy Yango Palencia, Asdrúbal, María Fernanda Pineda, Graciela Delgado, Marines Martínez, Ángelica Chourio, Manuel Cámara, Daniel Solaque, Rosa Medina, Vanessa Belisario, Carlos Nhora, Jonathan Morantes, Dalia, Karen, Lurif Mendoza, Consuelo Méndez, Carolina, Aura Barreto, Margot Medina, Eneida Zambrano, Aracelis.

Guarate D., Daniel

ESTABLECIMIENTO DE CRITERIOS INGENIERILES EN LA DETERMINACIÓN DE TASAS DE FUGAS Y SELECCIÓN DE PARÁMETROS EN EL CÁLCULO DE CONSECUENCIAS DE UNA EXPLOSIÓN POR NUBE DE VAPOR

Tutor académico: Prof. Andrés Rosales, Tutor Industrial: Ing. Nelson Mata. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. 2012, 92 pág.

Palabras Claves: explosiones, fuga de tuberías, Explosión por Nube de Vapor

Resumen: Una de las etapas importantes del Análisis Cuantitativo de Riesgos es el cálculo de la descarga y el cálculo de consecuencias, que implica un conjunto de operaciones matemáticas que se encuentran programadas en paquetes de simulación tales como: Phast 6.54; sin embargo, para el cálculo de la descarga el software no considera las diferentes etapas del proceso, las operaciones unitarias y los diferentes procesos fisicoquímicos que ocurren en esas operaciones unitarias, mientras que en el cálculo de consecuencias existen un conjunto de criterios para seleccionar los parámetros que no están claramente definidos. El objetivo principal de la presente investigación consiste en determinar los criterios que permiten seleccionar parámetros en la determinación de tasas de fugas y el Cálculo de Consecuencias de una Explosión por Nube de Vapor y la diferencia entre el flujo obtenido por Phast 6.54 con respecto a Hysys. Se usó como marco de referencia para evaluar los resultados la explosión ocurrida en La Terminal de LPG PEMEX, ocurrida el 19 de Noviembre de 1984, en San Juan Texhuapac, México. Para el cumplimiento de los objetivos se hicieron análisis de sobrepresión, variación del tamaño de la fuga y rango de parámetros obteniéndose que los criterios que presentaban mayor ambigüedad son: la definición de regiones obstruidas y el cálculo del grado de expansión para una fuente de explosión compuesta por múltiples regiones obstruidas, mientras que para el estudio de la descarga los resultados de flujo másico presentaban discrepancias debido a que Phast usa una trayectoria isentropica mientras que Hysys utiliza una trayectoria isoentálpica, incrementándose la brecha con el aumento del diámetro de la fuga.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	xv
ÍNDICE DE TABLAS.....	xvii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	3
FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
I.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
I.2. OBJETIVOS.....	4
1. Realizar una investigación documental de los métodos abreviados para el cálculo de sobrepresión de una mezcla explosiva.	4
CAPÍTULO II.....	6
MARCO REFERENCIAL	6
II.1 ANÁLISIS CUANTITATIVOS DE RIESGOS.....	6
II.4 ANTECEDENTES	38
CAPÍTULO III.....	39
METODOLOGÍA	39
III.1 Tipo de Investigación.	39
III.2 Diseño de la investigación: Metodología utilizada.	39
CAPÍTULO IV	43
RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	43
IV.1 Métodos abreviados.	43
IV.2 Métodos Rigurosos	45
IV.3 Cálculo de las distancia de afectación para los niveles de sobrepresión fijados empleando un modelo simplificado y modelos mejorados.....	53
III.2.4 Cálculo de flujo másico de descarga empleando Phast y Hysys.	71

III.2.5 Establecimiento de Criterios Ingenieriles para la selección de parámetros en la determinación de tasas de fugas y cálculo de consecuencias de una Explosión por Nube de Vapor.....	72
CONCLUSIONES.....	74
RECOMENDACIONES.....	76
BIBLIOGRAFÍA.....	77
ANEXO A	79
ANEXO B.....	86
ANEXO C	89
CÁLCULOS TIPO.....	89
1- Gráficos correspondientes a intensidad de explosión de 3 y 10 respectivamente para el método TNO Multienergía.....	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1. Proceso de Análisis Cuantitativo de Riesgo.....	12
Figura N° 2. Cálculo de la Descarga en Phast 6.53.....	12
Figura N° 3. Emisión instantánea o catastrófica.....	14
Figura N° 4. Escenario fuga por orificio.....	15
Figura N° 5. Ruptura de Línea.....	15
Figura N° 6. Escenario Tubería Larga	16
Figura N° 7. Pestaña para el modelo TNT EQUIVALENTE.....	19
Figura N° 8. sub-explosiones tomando lugar dentro de la nube.....	23
Figura N° 9. Sobrepresión escalada vs distancia escalada de la onda formada en la explosión de la nube para el Método de Multienergía.....	23
Figura N° 10. Duración escalada de la fase positiva vs distancia escalada de la onda formada en la explosión de nubes para el método de multienergía	24
Figura N° 11. Explosión por nube de vapor idealizada, como base de las curvas blast	30
Figura N° 12. Decadencia del pico de sobrepresión lateral con la distancia.....	31
Figura N° 13. Impulso escalado Vs distancia escalada desde el centro de la explosión	32
Figura N° 14. Distancia escalada vs Presión escalada, impulso escalado, duración de la fase positiva escalada	48
Figura N° 15 Layout de la Planta Pemex.....	58
Figura N° 16 Dispersión de la nube a las condiciones establecidas.....	59
Figura N° 17 Distancias de afectación para los niveles de sobrepresión fijados para el método TNO Multienergía con una intensidad de explosión de	61
Figura N° 18 Distancias de afectación para los niveles de sobrepresión fijados para el método TNO Multienergía con una ubicación del punto de ignición a 170 m de la liberación.....	61

Figura N°19 Distancias de afectación ubicando el epicentro de la explosión en el centro de la nube.....64

Figura N°20 Distancias de afectación ubicando el punto de ignición a 170 m de la liberación.....69

Figura N°21 Distancias de afectación ubicando el epicentro de la explosión en el frente del límite inferior de flamabilidad70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1. Valores de Eficiencia sugeridos por ARCHIE y FM Global, para algunas sustancias comúnmente usadas en el modelado de explosiones por nube de vapor...	22
Tabla N°2. Criterios para seleccionar el nivel de explosión más idóneo parámetro de las figura N° 9 y N° 10	29
Tabla N°3. Velocidad de la llama para el modelo Baker Strehlow Tang	34
Tabla N°4. Opciones para la determinación de los niveles de confinamiento y congestión de una fuente de explosión definida por múltiples regiones obstruidas	36
Tabla N°5. Relación entre nivel de confinamiento y confinamiento neto de una fuente de explosión de múltiples regiones obstruidas en BST.....	37
Tabla N°6. Relación entre nivel de congestión y la congestión neta estimada de una fuente de explosión de múltiples regiones obstruidas en BST.....	37
Tabla N°7. Cálculo de la sobrepresión fraccional	48
Tabla N°8. Velocidad de la llama para el modelo Baker Strehlow Tang	51
Tabla N°9. Conversión de Velocidad Lagrangiana a Euleriana	52
Tabla N° 10. Niveles de Sobrepresión a Evaluar	58
Tabla N°11. Distancia de Afectación para Niveles de Sobrepresión a Evaluar.....	59
Tabla N°12. Distancia de Afectación para Niveles de Sobrepresión a Evaluar.....	60
Tabla N° 13. Distancia de afectación variando la intensidad de la explosión para el método TNO Multienergía.....	60
Tabla N° 14. Distancia de afectación variando la ubicación del punto de ignición para el método TNO Multienergía.....	62
Tabla N° 15. Distancia de afectación variando la ubicación del epicentro de la explosión para el método TNO Multienergía.....	63
Tabla N°16. Grado de expansión de la llama.....	65
Tabla N°17. Densidad de obstáculos para el modelo Baker Strehlow Tang.....	66

Tabla N°18. Distancia de Afectación para Niveles de Sobrepresión a Evaluar.....	68
Tabla N°19. Distancia de afectación variando la ubicación del punto de ignición para el método Baker Strehlow Tang.....	68
Tabla N°20. Distancia de afectación variando la ubicación del punto de ignición para el método TNO Baker Strehlow Tang.....	69
Tabla N°21. Comparación de las Distancias de Afectación para los diferentes Modelos de Explosión.....	70
Tabla N°22. Flujo másico para condiciones de almacenamiento T:50°C y P:21,01 bar obtenidos con Phast 6.54 y Hysys.....	71
Tabla N°23. Flujo másico para condiciones de almacenamiento T:150°C y P:21,01 bar obtenidos con Phast 6.54 y Hysys.....	71

INTRODUCCIÓN

En todo proceso químico existe la posibilidad de que se generen múltiples factores de riesgos: comenzando por la destrucción parcial o total de equipos e instalaciones químicas hasta lesiones en individuos que operen o no las diversas maquinarias de dichas infraestructuras e incluso se suele dar el caso de apariciones de diversas enfermedades de niveles agudos o crónicos hasta el exterminio de poblaciones enteras.

Por tales motivos es de vital importancia que las distintas industrias químicas del país estén conscientes de los numerosos eventos que pueden tener lugar dentro de sus instalaciones ya que los riesgos siempre estarán presentes cuando se desarrolla la manipulación de compuestos químicos, debido a esto se tienen que tener claramente identificados los eventos o focos de inconveniente para poder predecir, decidir y actuar de una manera oportuna y eficaz ante dichos sucesos. Al tal fin, se requiere estimar la magnitud de cada riesgo, lo cual se hace a través de un análisis sistemático lo más completo posible de todos los aspectos que implica para la población, el medio ambiente y los bienes materiales.

Es así como se hace inevitable analizar estos riesgos y valorar si su presencia es o no admisible. El análisis de estos eventos se hace a través de un procedimiento denominado Análisis Cuantitativo de Riesgos (ACR), el cual en muchas empresas se realiza mediante herramientas computarizadas tales como: CANARY (Quest Consultants) y PHAST (Det Norske Veritas).

En efecto, un Análisis Cuantitativo de Riesgos se define según la Norma PDVSA IR-S-00 como un método de ingeniería y formulaciones matemáticas, combinadas con información estadística de fallas, para producir resultados numéricos de consecuencias de accidentes y sus frecuencias o probabilidades de ocurrencia, usados para estimar riesgo. Al realizar este análisis se trata de estimar el nivel de peligro potencial de una actividad industrial para las personas, el medio ambiente y los bienes materiales, para de esta manera cuantificar la magnitud del daño y de la

probabilidad de ocurrencia. Los análisis de riesgos, tratan de estudiar, evaluar, medir y prevenir los fallos y las averías de los sistemas técnicos y de los procedimientos operativos que pueden iniciar y desencadenar sucesos no deseados (accidentes) que afecten a la población y al medio ambiente. He ahí en donde radica la importancia de la realización de este tipo de estudios, ya que no sólo cuantifican los riesgos, sino que permiten establecer mecanismos y acciones para mitigar e incluso minimizar al máximo las consecuencias de un peligro y así evitar pérdidas humanas y de equipos e instalaciones.

Una de las etapas importantes del Análisis Cuantitativo de Riesgos es el cálculo de la descarga y el cálculo de consecuencias, la cual implica un conjunto de operaciones matemáticas que se encuentran programadas en paquetes de simulación tales como: Phast 6.54, sin embargo, para el cálculo de la descarga el software no considera las diferentes etapas del proceso, las operaciones unitarias y los diferentes procesos fisicoquímicos que ocurren en esas operaciones unitarias entre otras, mientras que en el cálculo de consecuencias existen un conjunto de criterios para seleccionar los parámetros que no están claramente definidos.

En atención a la problemática expuesta, se compararon los resultados obtenidos por los diferentes modelos de cálculo de consecuencias empleados en Phast 6.54 para una Explosión por Nube de Vapor aprobados para este tipo de estudio por PDVSA y las principales empresas de proceso del mundo. Se usó como marco de referencia para evaluar los resultados la explosión ocurrida en La Terminal de LPG PEMEX, ocurrida el 19 de Noviembre de 1984, en San Juan Texhuapec, México. El objetivo principal del trabajo consistió en determinar los criterios que permiten seleccionar parámetros en la determinación de tasas de fugas y cálculo de consecuencias de una Explosión por Nube de Vapor y la diferencia entre el flujo obtenido por Phast 6.54 con respecto a Hysys, evaluándose al mismo tiempo la facilidad de uso y la obtención de parámetros necesarios como el tiempo de ejecución de cada escenario. Para esto se hicieron análisis de sobrepresión, variación del tamaño de la fuga y rango de parámetros.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

I.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para comenzar un Análisis cuantitativo de riesgos, el primer paso es establecer las metas, los objetivos, la profundidad del estudio y las premisas a tomar en cuenta, entre otros aspectos claves que regirán la evaluación. La siguiente etapa corresponde a la identificación de los peligros inherentes al proceso o planta en la cual se evalúan, entre otros, los materiales, inventarios y las condiciones operacionales del proceso, etapas del proceso, y operaciones unitarias que pudiesen ocasionar eventos indeseables.

Seguidamente, es necesario enumerar y seleccionar los escenarios y puntos de la planta donde pueda ocurrir una fuga que posteriormente desembocarán en los casos sobre los cuales se realizará la estimación de la descarga, frecuencia de ocurrencia y cálculo de consecuencias, y de esta manera cuantificar el riesgo.

De lo anterior se desprende que el “Cálculo de Consecuencias” es una de las fases importantes de los Análisis Cuantitativos de riesgos, los cuales consisten en evaluar mediante modelos matemáticos de simulación el alcance de los daños por radiación térmica, ondas de sobrepresión y dispersión de gases tóxicos, originados por fugas y emisiones de sustancias tóxicas y/o inflamables, cuyos efectos sobre las personas, equipos y/o medio ambiente son nocivos. Para llevar a cabo estas evaluaciones y en paralelo con la extensión de los Análisis de riesgos en el campo de la industria petrolera, se ha desarrollado software de simulación como: PHAST-Det Norske Veritas y CANARY-Quest Consultants Inc. Estos paquetes se basan en modelos matemáticos que simulan el comportamiento fisicoquímico de sustancias tóxicas y/o inflamables, sin embargo, arrojan resultados diferentes para un mismo evento bajo las mismas condiciones, llegando las discrepancias en algunos casos a un 30 %, según MCL Control, empresa del área. Dichas diferencias podrían deberse a

los diversos criterios ingenieriles empleados en el momento de seleccionar los parámetros para el cálculo de consecuencias de una explosión.

Otra problemática presentada en el software se presenta en el cálculo del flujo de descarga, ya que Phast 6.54 utilizan modelos genéricos que no toman en cuenta las diferentes etapas del proceso, operaciones unitarias entre otras, por lo cual es recomendable una simulación del proceso utilizando un software como Hysys que permitiría determinar con mayor precisión la descarga del proceso.

Debido a la problemática expuesta anteriormente, surgen las siguientes incógnitas:

¿Cuál es la diferencia entre el flujo obtenido por Phast 6.54 y el Obtenido por Hysys?
¿Cuáles son los criterios ingenieriles para la selección de parámetros requeridos en el cálculo de consecuencias de una Explosión por Nube de Vapor?

I.2. OBJETIVOS

A continuación se muestran tanto el objetivo general como los objetivos específicos del presente trabajo de investigación.

I.2.1. General

Establecer criterios ingenieriles para la selección de parámetros en la determinación de tasas de fugas de escenarios típicos (rupturas y/o fugas) y en el cálculo de consecuencias de una Explosión por Nube de Vapor.

I.2.2. Objetivos Específicos

1. Realizar una investigación documental de los métodos abreviados para el cálculo de sobrepresión de una mezcla explosiva.
2. Realizar una investigación documental de los modelos utilizados por Phast 6.54 para el cálculo de sobrepresión de escenarios típicos de la industria petrolera.

3. Calcular distancias de afectación por sobrepresión de mezclas explosivas de escenarios propios de la industria petrolera utilizando métodos abreviados y Phast 6.54.
4. Calcular el flujo másico de fuga para escenarios típicos (Rupturas y/o fugas) usando una simulación de proceso (Hysys) o usando modelos genéricos de descarga (Phast 6.54).
5. Establecer criterios en la determinación de las tasas de fugas de escenarios típicos (Rupturas y/o fugas).
6. Establecer criterios en la selección de parámetros en el cálculo de consecuencias de una Explosión por Nube de Vapor.

CAPÍTULO II

MARCO REFERENCIAL

A continuación se describen los aspectos teóricos más importantes relacionados con el presente trabajo.

II.1 ANÁLISIS CUANTITATIVOS DE RIESGOS

Un Análisis Cuantitativo de Riesgo se define según la Norma PDVSA IR-S-00 como un método de ingeniería y formulaciones matemáticas, combinadas con información estadística de fallas, para producir resultados numéricos de consecuencias de accidentes y sus frecuencias o probabilidades de ocurrencia, usados para estimar riesgo. Al realizar este análisis se trata de estimar el nivel de peligro potencial de una actividad industrial para las personas, el medio ambiente y los bienes materiales, para de esta manera cuantificar la magnitud del daño y de la probabilidad de ocurrencia. Los análisis de riesgos, tratan de estudiar, evaluar, medir y prevenir los fallos y las averías de los sistemas técnicos y de los procedimientos operativos que pueden iniciar y desencadenar sucesos no deseados (accidentes) que afecten a la población y al medio ambiente. He ahí en donde radica la importancia de la realización de este tipo de estudios, ya que no sólo cuantifican los riesgos, sino que permiten establecer mecanismos y acciones para mitigar e incluso minimizar al máximo las consecuencias de un peligro y así evitar pérdidas humanas y de equipos e instalaciones.

II.1.1 Metodología del Análisis Cuantitativo de Riesgos.

La figura N°1 ilustra el proceso del Análisis Cuantitativo de Riesgos, la descripción y/o definición del sistema constituye el primer paso del ACR. La siguiente etapa corresponde a la identificación de los peligros inherentes al proceso o planta en la cual se evalúan, entre otros, los materiales, inventarios y las condiciones

operacionales del proceso que pudiesen ocasionar eventos indeseables (PDVSA IR-S-02,2004).

Habiendo identificado los peligros, es necesario cuantificar el nivel de riesgo implícito a objeto de determinar el alcance de las medidas de control. La cuantificación del riesgo está basada tanto en la estimación de la frecuencia de ocurrencia de accidentes como en el cálculo de sus consecuencias (PDVSA IR-S-02,2004).

Para estimar las frecuencias se utilizan base de datos y los métodos de árbol de eventos y de árbol de fallas. La estimación de consecuencias se efectúa mediante programas computarizados cuyas bases de cálculos deben estar aprobadas por PDVSA. La cuantificación del riesgo, será expresada en términos de riesgo individual y/o riesgo social (PDVSA IR-S-02,2004).

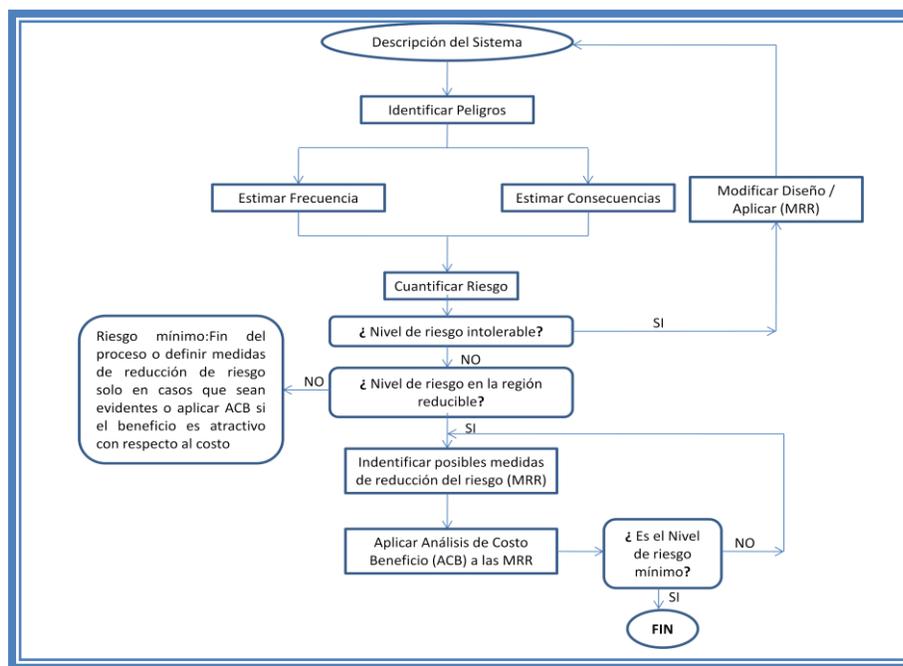


Figura N° 1 Proceso de Análisis Cuantitativo de Riesgo (PDVSA IR-S-02,2004).

II.1.2 Cálculo de Consecuencias

De los pasos que se deben seguir para un Análisis Cuantitativo de Riesgo se puede decir que el “Cálculo de Consecuencias” es una de las fases más importantes, ya que el riesgo es función de la frecuencia y consecuencia.

El objetivo de un cálculo de consecuencias es cuantificar el impacto negativo de un evento. Las consecuencias generalmente se miden en términos del número probable de muertos, aunque también es posible expresarlas en función del número de lesionados o de daños a la propiedad. Normalmente se consideran tres tipos de efectos: radiación térmica, ondas de sobrepresión por explosión y exposición a sustancias tóxicas.

Existe una gran variedad de modelos que se utilizan en el cálculo de consecuencias. Los modelos de fuente se utilizan para predecir la tasa de descarga, la evaporación instantánea de una sustancia, la cantidad de aerosol formado y la cantidad de sustancia evaporada. Los modelos de dispersión se utilizan para medir la dispersión en la dirección del viento, tomando en consideración las condiciones meteorológicas y la densidad del vapor. Los modelos de impacto permiten predecir las zonas de afectación debidas a fuego y explosión. Los modelos para gas tóxico se usan para predecir la respuesta humana debida a la exposición de un gas tóxico. Otros modelos se utilizan para predecir los efectos en humanos a la exposición a fuego y ondas de sobrepresión (AIChe, 1989).

Un Cálculo de Consecuencias usualmente consiste de los siguientes sub-estudios:

- Cálculo de descarga de sustancias inflamables/combustibles y tóxicas (cantidades, tasas, duración, etc.).
- Cálculo de niveles de radiación, sobrepresión y concentraciones inflamables y/o tóxicas
- Estimación de afectación a la integridad física de personas y equipos

Un cálculo de consecuencias debe contemplar como mínimo según la Norma PDVSA IR-S-02 (2004):

- Composición, temperatura, y presión del fluido antes del escape.

- Propiedades físicas, químicas y termodinámicas de los componentes del fluido.
- Ubicación y orientación del escape.
- Flujo normal de operación.
- Tiempo de cierre de válvulas.
- Volúmenes de recipientes y tanques.
- Dimensiones de las áreas de represamiento, incluyendo diques de tanques.
- Condiciones ambientales (velocidad del viento, estabilidad atmosférica, humedad relativa, temperatura del aire/suelo).
- Características del terreno, así como del área circundante

Escenarios a evaluar en un Cálculo de Consecuencias.

Típicamente los escenarios incluidos en un cálculo de consecuencias de una instalación que produce hidrocarburos son (PDVSA IR-S-02,2004):

- Fugas de fluidos tóxicos y/o inflamables/combustibles de equipos de proceso, tuberías y tanques de almacenamiento.
- Incendios que envuelven fugas de productos inflamables.
- Explosiones de nubes de vapor.
- Ocurrencia de bola de fuego en recipientes de proceso presurizados conteniendo gases licuados inflamables.

Modelos de simulación, Cálculos.

Dado que la estimación de consecuencias implica un alto nivel de complejidad y requiere una predicción lo más exacta posible del área afectada por cada peligro, es importante usar modelos apropiados para cada escenario específico y al mismo tiempo, aquellos que hayan demostrado proveer predicciones razonablemente precisas comparadas con los resultados obtenidos en pruebas de campo, a gran escala o en accidentes previos (PDVSA IR-S-02,2004).

Por cuanto la ejecución de un Análisis Cuantitativo de Riesgos implica la realización de gran cantidad de operaciones matemáticas para la estimación de consecuencias, es recomendable el uso de paquetes computarizados que contengan

modelos validados para este fin. En línea con esto PDVSA ha aprobado el uso de las siguientes herramientas de simulación:

- PHAST-Det Norske Veritas.
- CANARY-Quest Consultants Inc.

II.2 Explosiones.

II.2.1 Definición de Explosión.

Para la mayoría de la gente una explosión se asocia inmediatamente a una imagen de destrucción. No obstante, la mayoría de explosiones que se llevan a cabo diariamente son controladas, como las de los motores de los vehículos, la demolición de los edificios, la extracción de metales, minerales, etc.

En la literatura existen varias definiciones disponibles para la palabra explosión, AICHE/CCPS (1994), define una explosión como “una liberación de energía que provoca un Blast”. Un “Blast” posteriormente se define como “un cambio transitorio en la densidad del gas, la presión y la velocidad del aire que rodea un punto de explosión”. Groll y Louvar (1990) definen una explosión como “una expansión rápida de los gases resultantes que se mueven a una presión rápida o de onda de choque”. NFPA69 (NFPA, 1986) define una explosión como “el estallido o ruptura de un recinto u recipiente debido al aumento de la presión interna”. Una explosión puede ser considerada como una liberación rápida de un gas de alta presión al medio ambiente. Esta liberación debe ser lo suficientemente rápida que la energía se disipa en forma de presión u onda de choque. Las explosiones pueden surgir de fenómenos estrictamente físicos como la rotura catastrófica de un contenedor de gas a presión o de una reacción química como la combustión de un gas inflamable en el aire. Estas últimas reacciones pueden ocurrir dentro de edificios o buques o al aire libre en zonas altamente congestionadas (CCPS, 2003).

La descripción de los parámetros característicos de una explosión, así como la clasificación de las mismas se explica detalladamente en el Anexo A.

Explosión por nube de vapor (VCES)

Las explosiones más peligrosas y destructivas en la industria de procesos químicos son las explosiones por nube de vapor (Crowl, D y Louvar J., 2002).

Cuando una gran cantidad de líquido inflamable vaporizando o de gas se libera rápidamente, un vapor forma una nube y se dispersa con el aire circundante. La liberación puede producirse a partir de un tanque de almacenamiento, proceso, buque de transporte, o de una tubería. Si esta nube se enciende antes de que la nube se diluya por debajo de su límite inferior de inflamabilidad (LFL), una VCE o flash fire se va a producir. Para un ACR la principal consecuencia de una VCE es la sobrepresión, mientras que la principal consecuencia de un flash fire es el contacto directo de la llama y la radiación térmica. El resultado resultante, ya sea un flash fire o una VCE depende de un gran número de parámetros (CPPS, 2003).

CCPS (1994) ofrece un excelente resumen del comportamiento de la nube de vapor. Ellos describen cuatro características que deben estar presentes para que un VCE pueda producirse. En primer lugar, el material de liberación debe ser inflamable. En segundo lugar, una nube de tamaño suficiente debe formar antes de la ignición, con retrasos de ignición desde 1 hasta 5 min considerada como la más probable para la generación de explosiones de vapor de la nube. En tercer lugar, una cantidad suficiente de la nube debe estar dentro de los límites de inflamabilidad. En cuarto lugar, Confinamiento suficiente o mezclado turbulento de una porción de la nube de vapor debe estar presente.

La fuente más importante de turbulencia es generada por la combustión (se desarrolla como consecuencia de la propagación de la llama). Basado en la revisión de VCEs reales, la sobrepresión máxima en la nube de vapor es aproximadamente 15 psi para las áreas congestionadas. Para las áreas planas y sin obstrucciones, una sobre presión de 1,5 psi puede ser un valor predeterminado razonable. En la actualidad no se tiene disponible una guía completa para poder evaluar las áreas que se encuentran en las de alta congestión y las completamente abiertas (CPPS, 2003).

VCES son difíciles de caracterizar, principalmente debido al gran número de parámetros necesarios para describir un evento. Los accidentes ocurren en

circunstancias no controladas. Los datos recogidos de los hechos reales son en su mayoría poco fiables y difíciles de comparar (CPPS, 2003).

II.3 Modelos empleados en el cálculo de Consecuencias de una explosión por nube de Vapor en Phast 6.53.

Hay tres etapas en la modelación de consecuencias en Phast:

- Descarga.
- Dispersión.
- Efectos inflamables y tóxicos.

Estas etapas se ejecutan en sucesión. Primero la descarga (material liberado del almacenamiento), después la dispersión (formación de nube) y finalmente, efectos riesgosos.

II.3.1 Descarga.

La descarga es la despresurización del material desde las condiciones de proceso en el recipiente hasta la presión atmosférica (DNV, SF).

El programa calcula las condiciones en el orificio y también las condiciones al final de la descarga, definidas como aquellas cuando el material se ha expandido a la presión atmosférica. Son las condiciones al final de la descarga, las condiciones finales, las que se usan para determinar la dispersión del material, tal como se muestra en la figura N°2.

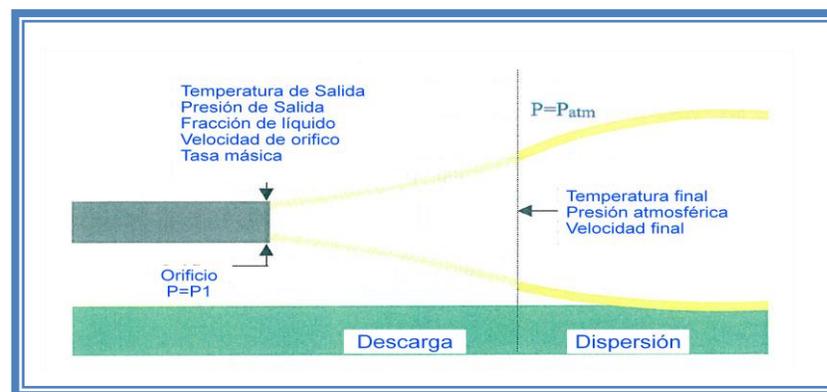


Figura N° 2 Cálculo de la Descarga en Phast 6.53 (DNV, SF)

El primer paso es determinar el estado del material antes de su liberación a la atmósfera.

En PHAST 6.53 es necesario definir las condiciones del recipiente antes de seleccionar el escenario. Dependiendo de las condiciones definidas, los escenarios disponibles variarán. A continuación hay una lista de los escenarios posibles para todas las combinaciones posibles.

Líquido saturado y Presión/Temperatura: El recipiente está a la presión de saturación de vapor del material. El usuario requiere alimentar la temperatura o la presión del sistema. Los escenarios posibles para esta situación son:

- Ruptura catastrófica.
- Ruptura de Línea.
- Ruptura de disco.
- Fuga.
- Emisión de 10 minutos.
- Válvula de alivio.
- Tubería Larga.
- Falla del Techo del Tanque.

Presión y Temperatura: El recipiente no está a la presión de saturación de vapor del material. El usuario tiene que proporcionar la temperatura y presión del sistema. Los escenarios posibles para esta situación son:

- Ruptura catastrófica.
- Ruptura de línea.
- Ruptura de disco.
- Fuga.
- Emisión de 10 minutos.
- Válvula de alivio.
- Tubería larga.

Presión Atmosférica y Temperatura: El recipiente está a presión atmosférica. El usuario solo requiere definir la temperatura del sistema. Los escenarios posibles para esta situación son:

- Ruptura catastrófica.
- Ruptura de línea.
- Fuga.
- Emisión de 10 minutos.
- Venteo de espacio de vapor.

Definición de escenarios.

PHAST selecciona el modelo apropiado de descarga para combinación de escenario y recipiente. Hay siete modelos principales de descarga:

Emisión Instantánea o catastrófica.

Durante la descarga, todo el inventario se vacía y expande en todas las direcciones. En este caso, el centro de la nube usualmente se mueve más lento. Este es un evento raro como se ilustra en la figura N°3.

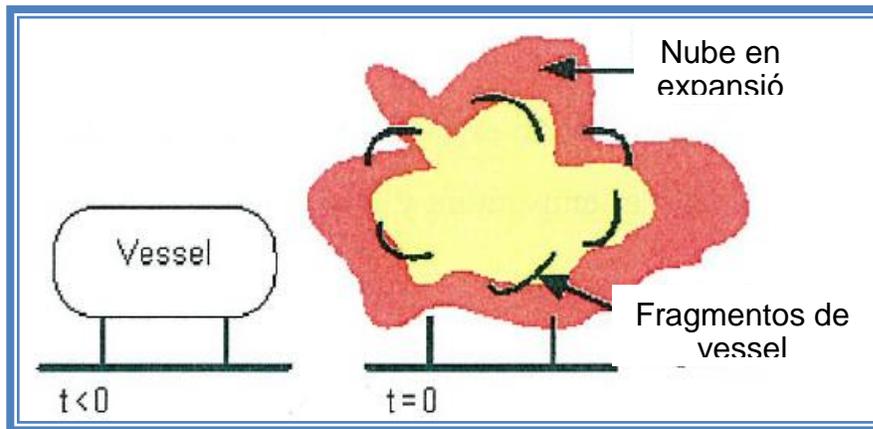


Figura N° 3 Emisión instantánea o catastrófica (DNV, SF).

Fuga por orificio.

Este tipo de emisiones se usa para emisiones de vapores y líquidos. Se asume que el orificio es redondeado y afilado, resultando en una emisión direccional. Las fugas son usualmente emisiones accidentales (DNV, SF).

Una emisión de duración fija es una emisión donde el diámetro del orificio se ajusta para alcanzar la duración especificada por el usuario.

A continuación la figura N°4 donde se muestra el escenario fuga por orificio.

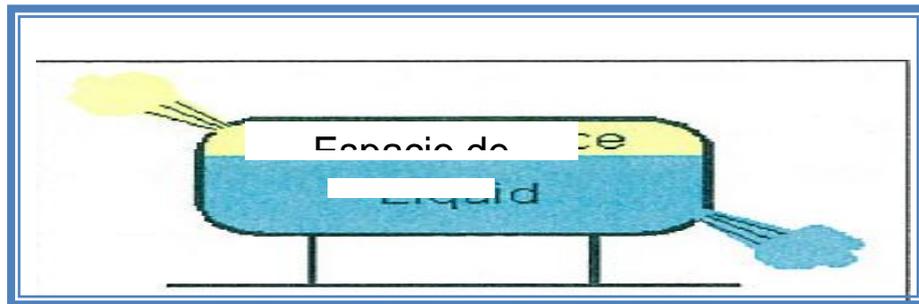


Figura N° 4 Escenario fuga por orificio (DNV,SF)

Ruptura de Línea

Las rupturas de líneas son emisiones direccionales y pueden usarse para líquidos y vapores, tuberías, discos y válvulas de alivio. Tipos específicos de rupturas de líneas incluyen válvulas de alivio y disco de ruptura, a continuación la figura N° 5 donde se ilustra un escenario de ruptura de línea.

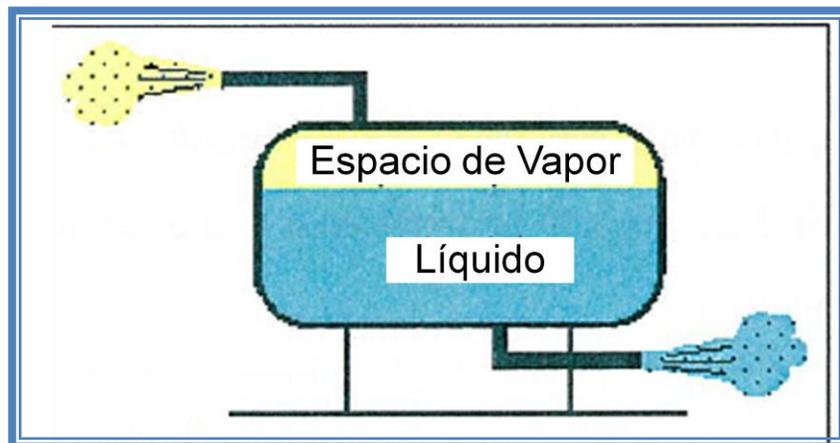


Figura N° 5 Ruptura de Línea (DNV,SF).

La diferencia principal entre una fuga y una ruptura de línea es que las rupturas de línea permiten evaporación dentro del sistema. Para calificar como ruptura de línea la relación de la longitud de la tubería al diámetro del orificio debe ser igual o mayor a tres (DNV, SF).

Tubería Larga.

Este escenario modela una descarga con variación en el tiempo para una rotura en una tubería larga. Se puede especificar la emisión en cualquier lugar a lo largo de la tubería, y se puede especificar el tamaño de la emisión (desde una emisión pequeña hasta una ruptura transversal). Los cálculos pueden considerar el efecto del flujo bombeado, y del tiempo y secuencia del cierre de las válvulas (DNV,SF).

Se debe usar este escenario si la tubería es larga (p. ej. Longitud $\gg 300 \cdot \text{Diámetro}$), o si se quiere modelar un tamaño de orificio menor a la ruptura transversal. Para rupturas transversales de tuberías más cortas, se debe usar el Escenario de Ruptura de Línea (DNV, SF).

A continuación la figura N° 6 donde se muestra el escenario tubería larga.

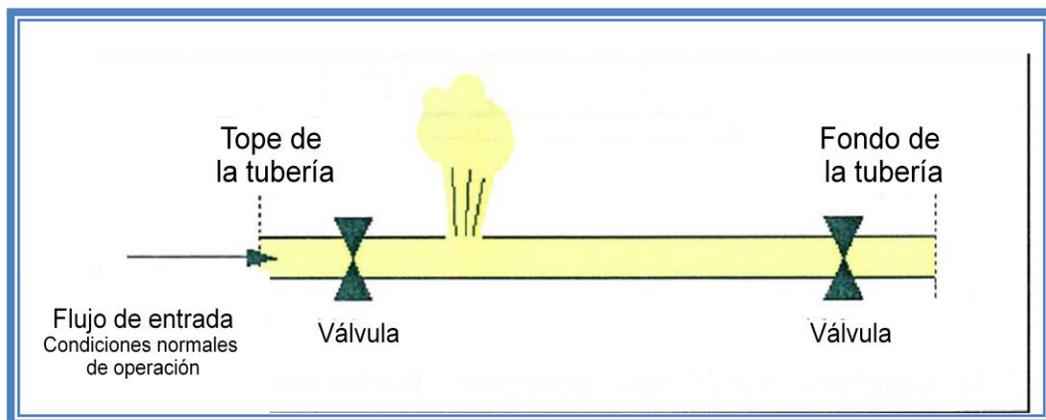


Figura N° 6 Escenario Tubería Larga (DNV, SF).

El resto de los escenarios que permite estudiar Phast 6.54 son:

- Ruptura de disco.
- Emisión de 10 minutos.
- Válvula de alivio.

- Tubería larga.
- Venteo de espacio de vapor.

Se puede observar que el programa Phast 6.54 no toma en cuenta las diferentes etapas del proceso, las operaciones unitarias, los diferentes procesos fisicoquímicos que ocurren en esas operaciones unitarias, lo cual es una desventaja del mismo en el cálculo de la descarga.

II.3.2 Dispersión.

Requerimientos generales de un Modelo de Dispersión.

PHAST usa los términos de fuente (resultados de descarga) como alimentación del modelo de dispersión. El modelo de dispersión usará entonces estos valores para predecir el tamaño, forma y concentración de la nube. Esta información es luego alimentada a los modelos de impacto inflamable, explosivo y tóxico (DNV, SF).

II.3.3 Modelado de Explosión de Nube de Vapor.

Se pueden hacer análisis detallados de consecuencias usando los modelos de explosión de TNT equivalente, TNO Multi-energía y Beaker Strehlow Tang.

Hay dos tipos de explosiones, una explosión temprana y una explosión tardía. La explosión temprana ocurre en el origen de la emisión. Esto es lo más común para emisiones instantáneas. La explosión tardía ocurre viento debajo de la emisión (DNV, SF).

Hay dos maneras de usar los modelos de explosión; ya sea como parte del análisis ligado (usando los modelos de tubería, recipiente o definidos por el usuario) o como modelos separados (de alimentación directa), observando solo los riesgos de interés (DNV, SF).

Modelado Detallado de Consecuencias de Explosión.

PHAST incluye tres modelos de explosión de nubes de vapor. Los modelos disponibles son:

- TNO Multi Energy.

- TNT Equivalence.
- Baker Strehlow Tang.

Cuando se usan estos modelos en el análisis el usuario debe definir qué tipo de modelo de explosión desean que se incluya como parte de los datos de alimentación del caso. Dependiendo que modelo se seleccione una pestaña se pondrá en negritas y requerirá información adicional.

Los modelos de explosión calculan los siguientes efectos peligrosos:

- Niveles de sobrepresión.
- Duración del impulso o del pulso (no disponible en el modelo TNT).

El algoritmo de cálculo para cada uno de los modelos así como los respectivos criterios para la selección de parámetros se explica detalladamente a continuación:

MÉTODO TNT EQUIVALENTE

El TNT es un explosivo convencional muy utilizado y los efectos provocados han sido muy estudiados, de manera que se conoce con suficiente aproximación la relación entre la masa de TNT que explota y la sobrepresión e impulso de la onda generada en función de la distancia al origen de la explosión. Como se comentó anteriormente, el método del TNT equivalente permite calcular los efectos de cualquier sustancia explosiva por comparación de la energía generada con la que liberaría una cantidad equivalente de TNT que produjera los mismo efectos (Lees, 1996).

Este modelo se basa en relacionar un peso equivalente de TNT con los patrones de daños provocados por una explosión de nube de vapor. Los modelos basados en la explosión de TNT tienen como propósito el cuantificar el potencial poder explosivo de un material y establecer los efectos dañinos potenciales para una determinada cantidad de material. En este modelo la energía de combustión disponible en la nube de vapor se convierte en un peso equivalente de TNT; así, cuando se conoce el peso equivalente de TNT las características de la detonación,

expresada como onda de sobrepresión, puede obtenerse para diferentes distancias del lugar de la explosión. La equivalencia de TNT para un material puede interpretarse como un factor de conversión que expresa la eficiencia del proceso de conversión de la energía química (calor de combustión) en energía mecánica (explosión). Para una detonación estequiométrica de una mezcla aire-hidrocarburo la eficiencia máxima teórica de la conversión del calor de combustión es de aproximadamente de 40%. Para la mayoría de los incidentes de explosión de nube de vapor las equivalencias de TNT se ha deducido que ha estado en un intervalo de 1 a 10%, basadas en el calor de combustión de la cantidad total de material liberado. Aparentemente solo una parte de la energía de combustión disponible está involucrada en una combustión explosiva (AIChE, 1996).

El algoritmo de cálculo y las respectivas ecuaciones se explican detalladamente en el Capítulo IV del presente trabajo.

Modelo de Equivalencia de TNT en Phast 6.54.

El modelo TNT es el modelo de explosión más directo proporcionado en PHAST. Produce solo resultados de sobrepresión (no impulso), de modo que se debe tener cuidado cuando se interpreten los resultados.

Sólo se requieren dos datos cuando se corre el modelo TNT, como se muestra en la figura N°7.

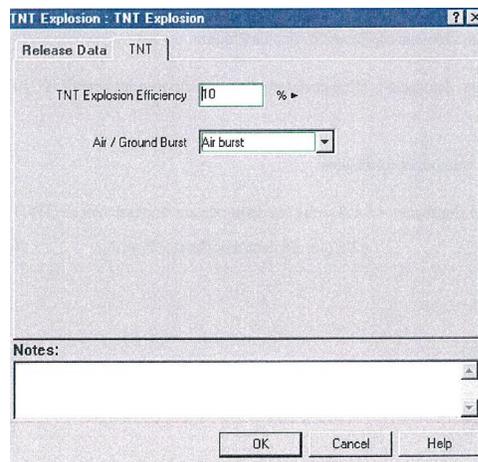


Figura N° 7 Pestaña para el modelo TNT EQUIVALENTE en (PHAST 6.53, SF).

El primero es el tipo de explosión que será modelada: con detonación en el suelo o con detonación en el aire. La detonación en aire se basa en un modelo esférico, la detonación en suelo en un modelo hemisférico.

El segundo dato adicional requerido por el modelo TNT es la eficiencia de la explosión de TNT. El modelo TNT iguala la nube con una masa equivalente de TNT. En el análisis la masa inflamable es calculada por PHAST, en el modelo separado la alimenta el usuario. PHAST después usa un estándar para el factor de eficiencia de 10% a menos que se sobrescriba por el usuario o se especifique para un material en la base de datos de materiales.

Criterios para la selección de parámetros.

Índice de Eficiencia.

El valor de eficiencia recomendado está entre 1 y 10, ya que según lo reportado por la mayoría de las bibliografías (CPPS, 2003),(Van den Bosh, 2006) para explosiones por nube de vapor la eficiencia es baja. La mayor parte de la energía liberada se disipa en forma de calor, invirtiéndose sólo una pequeña fracción en generar la onda de presión (Díaz, 2010).

Van den Berg y Lannoy (1993) analizaron 23 accidentes de nubes de vapor de hidrocarburos, observando que α tenía valores comprendidos entre $2 \cdot 10^{-4}$ y 0.159 con un valor medio de 0.03. En el 97% de los casos α resultó ser menor o igual a 0.1 y el 60% de los casos la media fue de 0.04

Phast, se basa en los índices de eficiencia publicados en el Handbook of Chemical Hazard Analysis Procedures, publicado por FEMA/DOT/EPA, 1989 y FM Global Property Loss Prevention Data.

La tabla N° 1 muestra los valores de eficiencia empleados en el modelo TNT equivalente para algunos componentes comúnmente usados y sus respectivas fuentes.

Tabla N° 1 Valores de Eficiencia sugeridos por ARCHIE y FM Global, para algunas sustancias comúnmente usadas en el modelado de explosiones por nube de vapor (DNV, 2006).

Compuesto	Eficiencia		Compuesto	Eficiencia	
	ARCHIE	FM Global		ARCHIE	FM Global
Acetaldehído	3%	5%	Dimetil sulfuro	3%	---
Acetona	3%	5%	Divinil éter	6%	10%
Acetileno	19%	15%	Etano	3%	5%
Acroleína	6%	10%	Etanol	3%	5%
Acrilonitrilo	3%	5%	Acetato de etilo	3%	5%
Acetato amílico	3%	5%	Etil amina	3%	5%
Alcohol amílico	3%	5%	Etil benceno	3%	5%
Benceno	3%	5%	Cloruro de etilo	3%	5%
Butadieno	3%	5%	Etil ciclohexano	---	5%
Butano	3%	5%	Formiato de etilo	3%	5%
Buteno	3%	5%	Nitrato de etilo	19%	15%
Acetato butilo	3%	5%	Nitrito de etilo	6%	10%
Di sulfuro de carbono	6%	10%	Propionato de etilo	3%	5%
Monóxido de carbono	3%	----	Etileno	6%	10%
Cianógeno	3%	5%	Dicloruro de etileno	----	5%
Ciclohexano	6%	5%	Óxido de etileno	19%	15%
Cymeme	3%	----	Cloruro de etidileno	---	5%
Diclorobenceno	3%	5%	Heptano	3%	5%
Dicloroetano	3%	---	Hexano	3%	5%
Dietil éter	6%	10%	Hidracina	19%	15%
Dimetil éter	3%	----	Ácido Cianhídrico	3%	5%

Cuando el compuesto no esté especificado, un valor de 10% es sugerido (DNV, 2006).

Factor de Reflexión de tierra.

Cuando la explosión ocurre en el aire, se toma un valor de 1, y cuando ocurre sobre tierra un valor de 2, ya que el modelo fue creado para explosiones en el aire.

Calor de combustión del TNT

El valor usado por Phast es de $4.7 \cdot 10^7$ j/Kg, el mismo se encuentra en el rango recomendado por CPPS, 2003.

Método TNO Multienergía.

Este método desarrollado por Van den Berg, permite predecir la forma, la duración, la sobrepresión y el impulso de la onda de sobrepresión de una manera sencilla y rápida. El método se basa en la suposición de que únicamente la parte de la nube que se encuentra parcialmente o totalmente confinada genera la onda de sobrepresión. Esto significa que la explosión de una nube de vapor será considerada como un conjunto de subexplosiones correspondientes a las distintas áreas de la nube que se encuentra parcialmente confinada, y la explosión total se modela como la que produciría un volumen igual a la suma de los volúmenes de cada una de las zonas obstruidas donde se generan las mencionadas subexplosiones, como se observa en la figura N°8 (Torres, 2010).

A continuación la figura N° 8, donde se muestra la forma semiesférica asumida en el modelo TNO Multienergía.

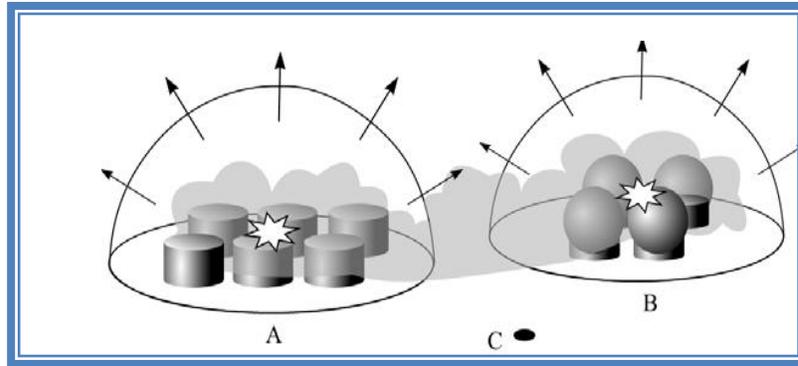


Figura N° 8 sub-explosiones tomando lugar dentro de la nube.(Assael y Kakasimo, 2010)

Según Torres (2010), el método supone que toda el área confinada será ocupada por una mezcla estequiométrica combustible/aire. La carga generada por esta mezcla se considera de forma simétrica con un radio $R_0 = ([1,5V \text{ área confinada} / \pi]^{1/3})$. Los parámetros del modelo (sobrepresión lateral, duración de la fase positiva, impulso, etc.) en su forma adimensional están representados gráficamente en función de la distancia escalada como se muestra en las figuras N° 9 y 10.

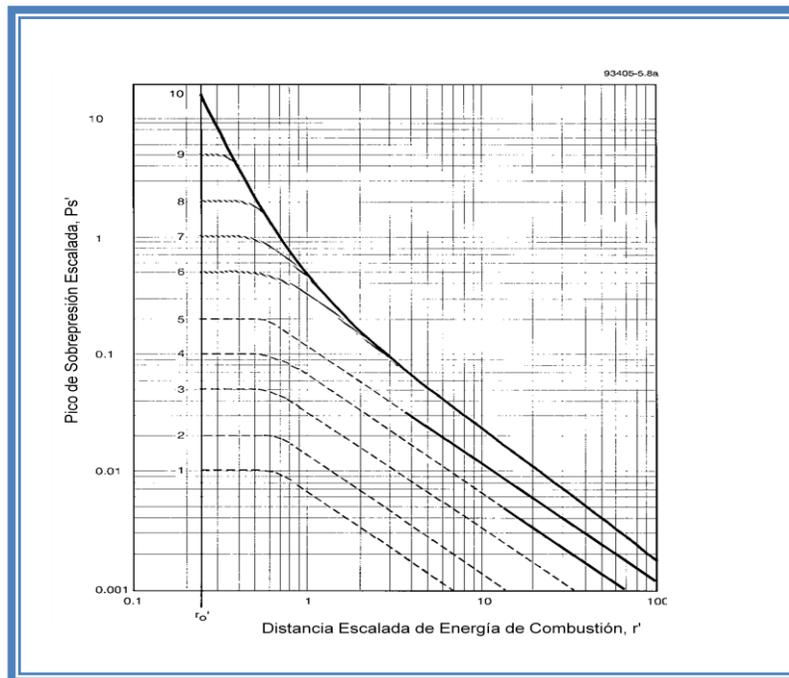


Figura N° 9 Sobrepresión escalada vs distancia escalada de la onda formada en la explosión de la nube para el Método de Multienergía (Van den Bosh, 1996)

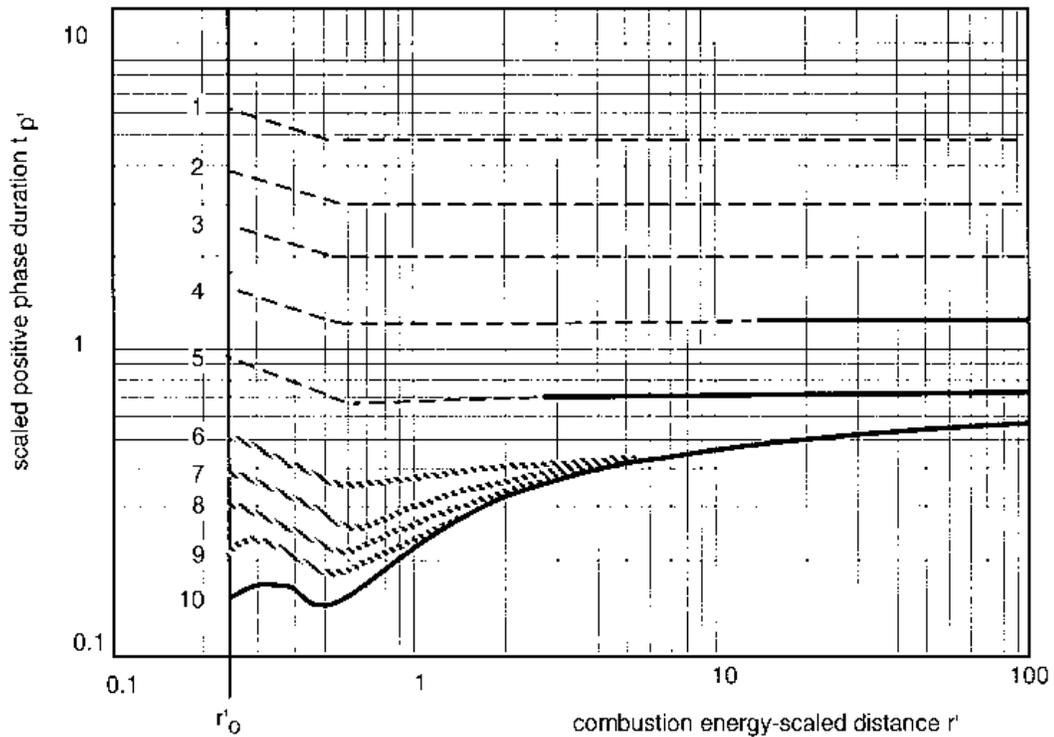


Figura N° 10 Duración escalada de la fase positiva vs distancia escalada de la onda formada en la explosión de nubes para el método de multienergía (Van den Bosh, 1996).

En cada uno de los gráficos se puede observar diez curvas numeradas del 1 al 10. Hay que escoger el valor que corresponda a la intensidad de la explosión. Este quizás es el problema importante de este método; en todo caso, si no son necesarios resultados muy exactos, se puede resolver de la manera siguiente: para efectos en zonas cercanas se toma el valor 10, que es conservador ya que supone la existencia de detonación: para puntos alejados se puede tomar cualquier valor mayor que 6 ya que como se puede deducir de las gráficas que los efectos en distancia largas no dependen de la energía inicial (Torres, 2010).

Se han propuesto correlaciones para determinar la sobrepresión, la presión dinámica y la duración de la fase positiva de la onda, en función de la distancia escalada. Estas correlaciones han sido establecidas a través de modelos fluidodinámicos de nubes con una energía de $3,5 \text{ MJ/m}^3$, que es el calor de combustión de la mayoría de los hidrocarburos en mezcla estequiométrica con el aire.

Se supone que la nube es semiesférica (de radio R_0), y de concentración estequiométrica y homogénea. Los resultados han sido contrastados experimentalmente con explosiones controladas y accidentales (Torres, 2010).

Los parámetros adimensionales R' y P' utilizados en las figuras N°9 y N°10 juntos con los parámetros t'_p (adimensional) y P_{dyn}' (adimensional), se determinan con las expresiones siguientes (Van den Bosh, 1996):

$$R' = \frac{R}{\left(\frac{E_{exp}}{P_{amb}}\right)^{1/3}} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

R' = Distancia escala ($\text{m}/(\text{J}/\text{Pa})^{1/3}$)

R = Distancia desde el centro de la explosión (m).

E_{exp} = Energía de la explosión (J).

P_{amb} = Presión ambiente (Pa).

$$P' = \frac{P}{P_{amb}} \quad \text{Ec.2}$$

Donde:

P' = Sobrepresión escalada (adimensional).

P_{amb} = Presión ambiente (Pa).

P = Sobrepresión generada (Pa).

$$t'_p = \frac{t_p v_a}{\left(\frac{E}{P_0}\right)^{1/3}} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

t'_p = Duración de la fase positiva escalada (adimensional).

v_a = Velocidad del sonido en el aire (340 m/s).

E = Energía de la explosión (J).

P_0 = Presión ambiente (Pa)

$$P_{dyn}' = \frac{P_{dyn}}{P_0} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

P_{dyn}' = Presión dinámica escalada (adimensional).

P_{dyn} = Presión dinámica (Pa).

Po= Presión atmosférica (Pa).

Para operar con las figuras N°9 y N° 10 es necesario estimar el volumen de la nube y conocer la disposición de los elementos y estructuras capaces de configurar obstrucciones y/o confinamiento de la nube. Con esos datos puede calcularse la energía de la explosión.

Criterio para el Cálculo del Volumen Confinado.

Definición de las regiones obstruidas, determinación de su volumen y de la energía de la explosión.

Una región obstruida es aquella en la que hay una elevada densidad de objetos, equipos y/o edificaciones (Assael y Kakosimos, 2010).

El procedimiento de construcción de una región obstruida se basa sobre el efecto que los obstáculos tienen en la generación de turbulencia. El espacio alrededor del centro de la explosión se separa en regiones obstruidas y no obstruidas. La nube solo puede extenderse en el espacio libre en cada una de las regiones obstruidas (Assael y Kakosimos, 2010).

Dos reglas empíricas han sido propuestas en orden para incluir o no un nuevo objeto en una región obstruida. Más específicamente, la distancia, X(m), entre cada nuevo objeto y su anterior deberán cumplir las siguientes dos condiciones (Van den Bosh, 1996):

a) $X < 25 m$ Ec. 5

b) $X < 10D_1$ ó $X < 1,5D_2$ Ec.6

Donde:

D_1 = Dimensión más pequeña del objeto sobre el plano perpendicular en la dirección de propagación de la llama (m).

D_2 = Dimensión del objeto paralelo a la dirección de propagación de la llama (m).

Cálculo del volumen de las zonas obstruidas:

- Modelar cada zona obstruida como una caja paralelepípedica de dimensiones a_i , b_i y c_i (metros), por lo que el volumen de la caja $V_{caja\ i}$, vendrá dado por la expresión(Díaz,2010):

$$V_{caja\ i} = a_i * b_i * c_i \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

$V_{caja\ i}$ = Volumen de la zona obstruida (m^3)

a_i = ancho de la caja (m).

b_i = largo de la caja (m).

c_i = alto de la caja (m).

- Obtención del volumen libre dentro de la caja, mediante la expresión (Díaz,2010):

$$V^*nube\ i = V_{caja\ i} - V_{obj\ i} \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

$V^*nube\ i$ = Volumen libre dentro de la caja (m^3).

$V_{obj\ i}$ = Volumen de los objetos contenido dentro de la caja (m^3).

- El volumen total de la región obstruida, V_{gr} , es la suma de los volúmenes $V^*nube\ i$ de la caja, obtenidos mediante la ecuación N°8.

$$V_{gr} = \sum V_{nube\ i} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

V_{gr} = Volumen total de la región obstruida (m^3).

- El volumen de la parte no obstruida o libre de la nube, V_o es:

$$V_o = V_c - V_{gr} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde:

V_o = Volumen de la parte no obstruida o libre de la nube (m^3).

V_c = Volumen de la nube (m^3).

V_{gr} = Volumen de la región obstruida (m^3).

Criterios para seleccionar el nivel de explosión apropiado.

La principal dificultad del procedimiento radica en la selección del nivel de explosión apropiado para cada caso, dada la diversidad de parámetros que influyen en el proceso. La intensidad de la explosión depende de la masa y reactividad del combustible, de la congestión y/o confinamiento de la nube, de la intensidad de la fuente de ignición y de parámetros relacionados con la geometría de la zona obstruida (Díaz, 2006).

Los criterios aportados por algunos autores pueden constituir alguna una ayuda para seleccionar el nivel adecuado. El criterio más simple es el propuesto por TNO en el caso de ausencia de información sobre los factores mencionados anteriormente, consistentes en seleccionar el nivel 7 cuando la explosión se produzca en una región obstruida, y el 3 en una zona sin obstáculos. Dependiendo de la cantidad de información disponible y del grado de precisión requerido se pueden seguir otros criterios, destacando los de Kinsella (1993) y Baker (1996), recomendable cuando sólo se dispone de información cualitativa, y especialmente las de las Guías GAME (1998) y GAMES (1998), en los casos que se disponga de información más amplia (Díaz, 2006).

Kinsella (1993) tiene en cuenta el nivel de obstrucción de la nube, clasificándolo en alto, bajo y nulo; la existencia o no de confinamiento entre paredes paralelas y la energía de la fuente de ignición, distinguiendo entre fuerte (si es debida al venteo de una explosión en el interior de una conducción o situación análoga), y débil (si es debido a una llama, chispa o superficie caliente). La tabla N°2 contiene los criterios citados que permiten seleccionar los niveles más adecuados en las figuras N°9 y N°10, aunque con un elevado nivel de incertidumbre.

Tabla N°2 Criterios para seleccionar el nivel de explosión más idóneo parámetro de las figura N° 9 y N° 10 (Van den Bosh, 1996).

Obstrucción			Confinamiento entre planos paralelos	Energía de la fuente de ignición		Intensidad de la explosión
Alta	Baja	Nula		Débil	Alta	
Sí			Sí		Sí	7-10
Sí			No		Sí	7-10
Sí			Sí	Sí		5-7
	Sí		Sí		Sí	5-7
	Sí		No		Sí	6-7
		Sí	Sí		Sí	6-7
Sí			No	Sí		4-5
		Sí	No		Sí	4-5
	Sí		Sí	Sí		3-5
	Sí		No	Sí		2-3
		Sí	Sí	Sí		1-2
		Sí	No	Sí		1

PHAST sugiere emplear el siguiente criterio:

Fuerza de la detonación de la sub-explosión.

- | | |
|-----------------------------|-----------------------------|
| 1 - No confinada | Campo Abierto |
| 2 - Casi no confinada | Campo Abierto Pocos Árboles |
| 7 -Ligeramente confinada | Patio de Tanques |
| 10 -Moderadamente confinada | Equipo de proceso |

La fuerza de detonación alimentada predice la curva seleccionada (1-10) para calcular sobrepresiones.

Método Baker Strehlow Tang.

El método Baker Strehlow-Tang pertenece al mismo grupo de modelos de explosión al que pertenece el Modelo Multienergía, los cuales usan curvas de Blast para predecir las consecuencias de una Explosión por Nube de Vapor. Las curvas de Blast son usualmente desarrolladas basándose en simulaciones de CFD de casos idealizados y proporcionan sobrepresión, impulso y duración de la fase positiva como una función de la distancia desde la explosión (DNV, 2010).

El modelo Baker Strehlow fue primero publicado en el vigesimooctavo Simposio de Prevención de Pérdidas en 1994. Se usó el enfoque Strehlow de seleccionar las curvas Blast basadas sobre la velocidad de la llama y los procedimientos del modelo Multienergía para determinar la energía de la explosión sobre la base de confinamiento y congestión (DNV, 2010).

La metodología Baker-Strehlow incluye una tabla de velocidad de la llama y una familia de curvas de blast para sobrepresión e impulso en función del número de Mach. Desde 1994, el modelo ha evolucionado a través de la investigación y aplicación de análisis de peligros. La tabla de velocidad de la llama ha sido actualizada para incluir un confinamiento de 2.5D en 1998 una nueva tabla fue publicada en el 2005. Las curvas Blast fueron actualizadas en 1999 y el modelo fue luego renombrado Baker-Strehlow- Tang (DNV, SF).

La metodología BST consiste de una familia de curvas blast para pico de sobrepresión lateral e impulso versus distancia escalada para ambas fases positiva y negativa de la onda de choque de una explosión por nube de vapor. Debido a que la fase positiva es usualmente la que causa mayor daño, BST solo predice la sobrepresión e impulso de la fase positiva. Esas curvas fueron derivadas a partir de simulaciones numéricas detalladas de escenarios de explosión idealizados de cargas aire-combustible de concentración estequiométrica (DNV, 2010).

A continuación se muestra la figura N°11, donde se ilustra la forma idealizada de una explosión por nube de vapor para el modelo Baker-Strehlow-Tang.

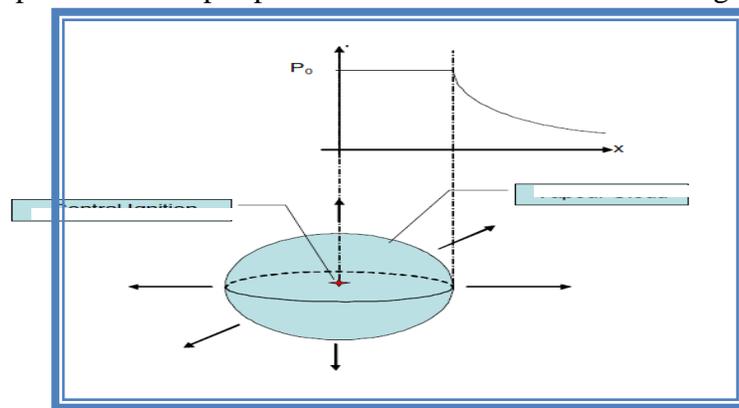


Figura N° 11, Explosión por nube de vapor idealizada, como base de las curvas blast (DNV, 2010).

La figura N°11 ilustra el escenario idealizado y la principal característica del modelo. La simetría es rotacionalmente simétrica con un radio inicial r_0 . La simetría se conserva con la prescripción de encendido central. El frente de llama se propaga entonces simétricamente desde el centro. Debido a la simetría una sola curva puede describir el comportamiento de la explosión. En el modelo la zona de combustión, es decir, dentro de la fuente de explosión, se caracteriza por un único nivel de pico de sobrepresión, P_0 . Luego, fuera de esta zona la explosión se modela como una onda de choque que decae con la distancia, como se muestra en la figura N°12 para sobrepresión lateral y en la figura 12 para impulso (DNV, 2010).

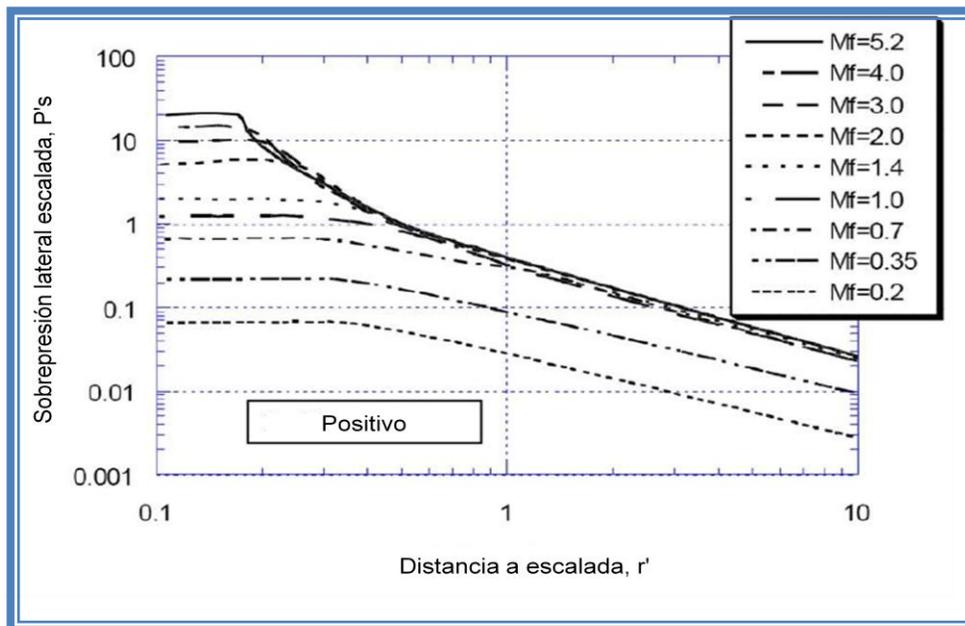


Figura N° 12 Decadencia del pico de sobrepresión lateral con la distancia (DNV, 2010).

Las ecuaciones empleadas por este sonda son las siguientes:

$$P'_s = \frac{\Delta P_s}{P_a} \text{ Ec. 11}$$

Donde:

P'_s = sobrepresión lateral escalada (adim).

P_a = Presión atmosférica (Pa).

ΔP_s = Sobrepresión generada (Pa).

$$r' = \frac{r}{\left(\frac{E}{Pa}\right)^{1/3}} \quad \text{Ec. 12}$$

Donde:

r' = Distancia escalada

r = Distancia desde el centro de la explosión al punto de interés (m).

E = Energía total de la combustión (J).

La familia de curvas para el impulso se obtuvo de manera similar como se obtuvieron las de sobrepresión y se muestran en la figura N°13.

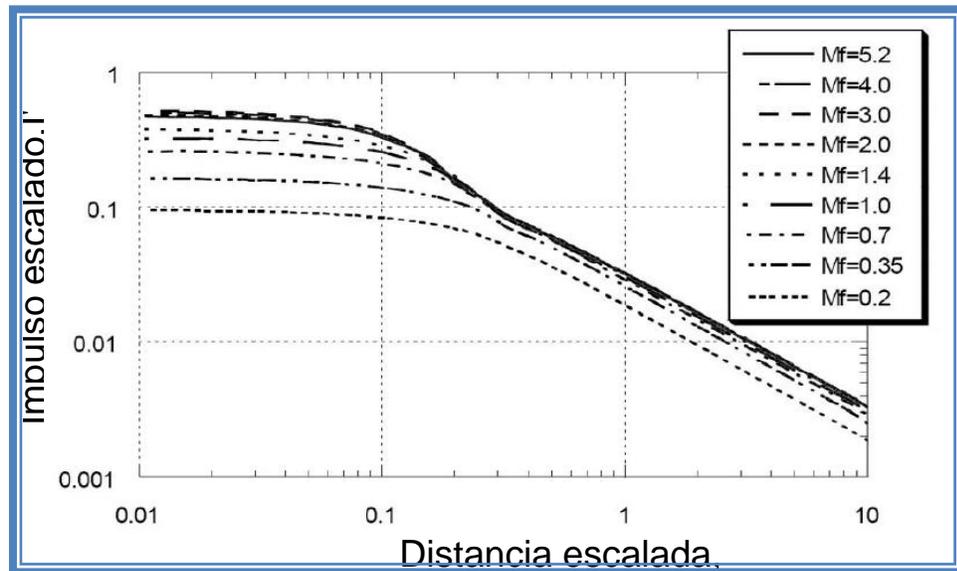


Figura N°13 Impulso escalado Vs distancia escalada desde el centro de la explosión (DNV, 2010).

El impulso escalado se define como:

$$I' = \frac{I v_a}{P_a \left(\frac{E}{Pa}\right)^{1/3}} \quad \text{Ec.13}$$

Donde:

I' = impulso escalado (adimensional).

I = Impulso

v_a = Velocidad del sonido en el aire.

Para aplicar el modelo el analista debe convertir un escenario del mundo real en uno equivalente lo más cercano posible a la explosión por nube de vapor ideal y luego usar la curva apropiada para buscar los valores de sobrepresión e impulso en una distancia dada desde el centro de la explosión. El modelo es muy diferente a los modelos fluidodinámicos, donde una explosión específica se modela matemáticamente con descripción detallada del escenario. Como consecuencia los modelos CFD pueden predecir mucho más detalladamente las salidas, como comportamiento de la sobrepresión con el tiempo y la localización de la ignición la cual puede estar en el borde de una explosión. Con el modelo Baker Strehlow Tang, las salidas están limitadas al pico de sobrepresión e impulso y la explosión es simétrica (DNV, 2010).

La tabla de la Velocidad de la Llama.

Strehlow sugirió que el efecto combinado de confinamiento, reactividad del combustible y congestión puede ser usado para correlacionar la velocidad de la llama y una tabla de 27 posibles combinaciones de esos tres parámetros fue propuesto basados sobre una geometría de 1D, 2D y 3D. Esto se conoce como la tabla de la velocidad de la llama. Esta tabla ha sido actualizada dos veces para mejorar las predicciones debido a los nuevos experimentos y resultados numéricos (DNV, 2010).

Las unidades de procesos normalmente tienen diversos niveles de confinamiento y congestión dentro de ellas y se encontró difícil seleccionar entre geometría 2D y 3D para la evaluación de peligros. La solución para esto fue introducir un nivel de confinamiento intermedio, por ejemplo, confinamiento 2.5D, para el caso donde el confinamiento este hecho de paneles frágiles o por cerca de paneles de confinamiento sólido. La velocidad de la llama para el confinamiento 2.5D fue determinada mediante una simple interpolación lineal de las velocidades de llama correspondiente a los niveles de confinamiento 2D y 3D en la misma congestión y niveles de reactividad del combustible. La tabla N° 3, muestra la tabla de velocidad de la llama actualizada, publicada en el 2005 y que es usada en el modelo Baker-Strehlow-Tang (DNV, 2010):

Tabla N°3 Velocidad de la llama para el modelo Baker Strehlow Tang (DNV, 2010).

Grado de Confinamiento	Reactividad del material	Congestión		
		Baja	Media	Alta
2D	Alta	0,59	DDT	DDT
	Media	0,47	0,66	1,6
	Baja	0,079	0,47	0,66
2.5D	Alta	0,47	DDT	DDT
	Media	0,29	0,55	1
	Baja	0,053	0,35	0,5
3D	Alta	0,36	DDT	DDT
	Media	0,11	0,44	0,5
	Baja	0,026	0,23	0,34

Criterios para la selección de parámetros críticos.

Confinamiento.

El confinamiento puede ser descrito como el grado de expansión. La nueva tabla de velocidad de la llama tiene tres niveles de confinamiento: 2D, 2,5D y 3D. Una región obstruida se considera que es 3D si la llama es libre para expandirse en todas las direcciones, 2D si la llama solo puede expandirse en dos dimensiones y se restringe en la tercera dimensión y 2.5D cuando el confinamiento se realiza entre 2D y 3D (DNV, 2010).

Congestión.

La congestión se clasifica como baja, media y alta, la cual se establece dependiendo de la relación de volumen bloqueado (VBR) y pitch (distancias entre filas sucesivas o capas de obstáculos) en la ruta de la llama como (DNV, 2010):

- Nivel de congestión baja: algunos obstáculos en la ruta de la llama o VBR menor de 0,06% y pocas capas de obstáculos.
- Nivel de congestión medio: Cualquier región que cae entre alto y bajo.
- Nivel de congestión alto: Capas de obstáculos estrechamente espaciados con un VBR mayor de 0.8% o superior.

Reactividad.

La reactividad del material se clasifica como baja, media y alta. El metano y monóxido de carbono son los materiales considerados como de baja reactividad, mientras el hidrógeno, acetileno, etileno, óxido de etileno y propileno son de alta reactividad, el resto de los materiales tienen reactividad media. En general, combustibles de reactividad media de un solo componente, tienen velocidades de quemado laminar entre 0,45-0,75 m/s, Combustibles de baja y alta reactividad tienen velocidades más bajas que 0,45m/s y más alta que 0,75 m/s respectivamente (Baker et al, 1997). Sin embargo, la velocidad de quemado laminar no es solo variable con la reactividad del material y hay materiales que son clasificados de alta reactividad, pero tienen una velocidad de quemado menor de 0,75m/s, como el etileno (DNV, 2010).

Curvas Blast para fuentes de explosión formadas de múltiples regiones obstruidas usando BST.

La metodología Baker Strehlow Tang recomienda que las regiones obstruidas estén promediadas en una única área de confinamiento y congestión y promedio puede estar basado bien sea en criterios de ingeniería o en un volumen promedio. BST tiene los métodos para establecer esas recomendaciones (DNV, 2010).

Cálculo de la velocidad de la llama de la obstrucción.

En el modelo Baker Strehlow Tang, los niveles de confinamiento y congestión de una fuente de explosión formada por múltiples regiones obstruidas pueden ser determinados usando una de las cuatro opciones dadas en la tabla N° 4.

Tabla N°4 Opciones para la determinación de los niveles de confinamiento y congestión de una fuente de explosión definida por múltiples regiones obstruidas (DNV, 2010).

Opción	Nivel de Confinamiento	Nivel de Congestión
1 (Opción por defecto)	Volumen promedio de todas las regiones obstruidas.	Volumen promedio de todas las regiones obstruidas.
2 (El peor de los casos)	Mayor confinamiento de las regiones obstruidas.	Mayor congestión entre las regiones obstruidas.
3	Volumen promedio de todas las regiones obstruidas.	Mayor congestión entre las regiones obstruidas.
4	Mayor confinamiento de las regiones obstruidas.	Volumen promedio de todas las regiones obstruidas.

Nivel de Confinamiento Promedio.

El confinamiento se determina por la capacidad del frente de llama de expandirse en 1, 2 o 3 dimensiones. El confinamiento de las regiones obstruidas se define como 2D, 2.5D o 3D para la metodología Baker Strehlow Tang. Una región obstruida se considera que es 3D si la llama es libre a expandirse en las tres direcciones, 2D si la llama solo puede expandirse en dos direcciones y se restringe la tercera dimensión y es 1D si se expande solo en una dimensión. La categoría 1D no está incluida en la tabla de velocidades de la llama actualizada, debido a que también es función de la relación entre la longitud y el diámetro adicional a los otros tres parámetros. 2.5D es un nivel de confinamiento entre 2D y 3D.

Baker Strehlow Tang calcula el nivel de confinamiento promedio como sigue:

$$\bar{C}_f = \frac{\sum_{i=1}^{Nobstr} V_{gr,i} * C_{f,i}}{\sum_{i=1}^{Nobstr} V_{gr,i}} \quad \text{Ec.14}$$

Donde:

$Nobstr$ = Número de regiones obstruidas en una fuente de explosión (adimensional).

$V_{gr,i}$ = Volumen de la región obstruida (m³).

$C_{f,i}$ = Valor correspondiente al nivel de confinamiento para la región obstruida i . (adimensional).

\overline{C}_f = Confinamiento neto de la fuente de explosión.

El confinamiento neto es luego convertido a nivel de confinamiento 2D, 2.5D y 3D usando la conversión dada en la tabla N°5.

Tabla N°5 Relación entre nivel de confinamiento y confinamiento neto de una fuente de explosión de múltiples regiones obstruidas en BST (DNV, 2010).

Nivel de Confinamiento	Confinamiento promedio estimado mediante la ecuación N°14
2D	≤ 2.25
2.5D	> 2.25 y ≤ 2.75
3D	> 2.75

La metodología Baker Strehlow Tang no ha recomendado un método para determinar el confinamiento representativo de una fuente de explosión que cubre múltiples regiones obstruidas con diferentes confinamientos

Nivel de Congestión Promedio.

Baker Strehlow Tang calcula la congestión neta promedio mediante el cálculo de la relación promedio de volumen bloqueado:

$$\overline{VBR} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{obstr}} V_{obsti}}{\sum_{i=1}^{N_{obstr}} V_{or,i}} \quad \text{Ec.15}$$

Donde:

V_{obsti} = Volumen total de los obstáculos de la región obstruida i (m³).

$V_{or,i}$ = Volumen total de la región obstruida (m³).

Luego usando la tabla N°17, se obtiene la densidad de obstáculo promedio.

II.4 ANTECEDENTES

Esta sección del trabajo se hace referencia a las investigaciones realizadas por diversos expertos en el área de software comerciales. Es importante destacar que se realizó una búsqueda exhaustiva sobre los estudios realizados en Venezuela con resultado negativo. Por tales motivos se tomó como referencia documentación extranjera, entre ellas se destacan las siguientes:

En el año 1999, Quest Quarterly, casa matrix del Canary publicaron un paper donde comparaban los modelos TNO Multienergía y Baker Strehlow, en este estudio se mostraban y comparaban las ecuaciones de ambos modelos, y establecieron que la principal diferencia entre ambos modelos era el método de construcción de sus curvas características, también estudiaron un caso base y compararon las distancias de afectación para sobrepresiones fijadas determinando que para rango de sobrepresiones mediana ambos modelos predicen distancias de afectación similares contrario para bajas y altas presiones donde las predicciones pueden variar sustancialmente.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

A continuación se describen los pasos que se siguieron en el desarrollo del presente trabajo, como la selección del tipo y carácter de la investigación y los procedimientos metodológicos.

III.1 Tipo de Investigación.

Esta propuesta se caracteriza por poseer un diseño de trabajo de campo de carácter comparativo. Según lo señalado en el Manual de Trabajo de Grado de Especialización y Maestría y Tesis Doctorales (2010) una investigación de campo se caracteriza por un análisis sistemático de problemas en la realidad, con el propósito bien sea de describirlos, interpretarlos, entender su naturaleza y factores constituyentes, explicar sus causas y efectos, o predecir su ocurrencia, haciendo uso de métodos característicos de cualquiera de los paradigmas o enfoques de investigación. Los datos de interés son recogidos en forma directa de la realidad; en este sentido se trata de investigaciones a partir de datos originales o primarios.

III.2 Diseño de la investigación: Metodología utilizada.

Para el cumplimiento de los objetivos descritos en la presente investigación, se siguió el procedimiento siguiente:

III.2.1 Revisión Bibliográfica Métodos Abreviados.

Se realizó una revisión bibliográfica en la literatura especializada (textos, códigos, estándares, informes, proyectos, tesis, documentos técnicos, Normas PDVSA) entre ellos: 1) Guidelines for chemical process quantitative risk analysis de la CPPS, 2) The Yellow Book (TNO) y 3) Fires, Explosions and Toxic Gas, entre otros, para profundizar en los aspectos relacionados con los modelos disponibles para el cálculo de una Explosión por Nube de Vapor simplificados (TNT EQUIVALENTE, TNO Multienergía y Baker Strehlow Tang) con la finalidad de

tener un estimado del orden de magnitud de los resultados de las distancias de afectación por sobrepresión.

III.2.2 Revisión Bibliográfica Métodos Rigurosos.

Para el cumplimiento de este objetivo se analizaron los documentos disponibles en el software Phast 6.54 (Tutoriales) con la finalidad de revisar los modelos de cálculo mejorados que usa el software para el cálculo de distancias de afectación por sobrepresión así como sus parámetros críticos y simplificaciones incluidos en cada una de las ecuaciones y las mejoras hechas por el software a cada modelo.

III.2.3 Cálculo de distancias de afectación por sobrepresión

Para el cálculo de distancias de afectación se utilizaron tres modelos: TNT Equivalente (Simplificado), TNO Multinergia (Mejorado) y Baker Strehlow Tang (Mejorado) con el siguiente procedimiento:

Con los tres modelos se hizo inicialmente los siguientes pasos:

- Definición del escenario a ser evaluado.
- Caracterización de la mezcla (Sustancia, Reactividad y Punto de Inflamación).
- Establecimiento de las condiciones meteorológicas.
- Estimación de las condiciones de Proceso: Temperatura, Presión e inventario.
- Corrida de una simulación preliminar en orden a estimar la dispersión de la nube sobre la planta.
- Calculo del volumen de la nube.
- Definición de las regiones obstruidas y cálculo de sus respectivos volúmenes.

- Definición de los niveles de sobrepresión a ser evaluados, los cuales fueron establecidos según lo reportado en la norma PDVSA IR-S-02.

Culminados estos pasos, dependiendo del modelo se siguieron otros pasos mostrado a continuación:

TNT Equivalente:

- Establecimiento de la eficiencia de la explosión.
- Establecimiento del factor de modificación de la masa.
- Corrida de la simulación para el cálculo de distancias de afectación para los niveles de sobrepresión establecidos.
- Análisis de la simulación corrida.

TNO Multinergia:

- Definición de la intensidad de explosión inicial.
- Corrida de la simulación para el cálculo de distancias de afectación para los niveles de sobrepresión establecidos.
- Corrida de la simulación para el cálculo de distancias de afectación para los niveles de sobrepresión establecidos variando la intensidad de la explosión.
- Corrida de la simulación para el cálculo de distancias de afectación para los niveles de sobrepresión establecidos variando la ubicación la del punto de ignición.
- Corrida de la simulación para el cálculo de distancias de afectación para los niveles de sobrepresión establecidos variando la ubicación del epicentro de la explosión.
- Análisis de cada una las simulaciones corridas.

Baker Strehlow Tang.

- Definición del grado de expansión de la llama.

- Cálculo de la densidad de obstáculos de la región obstruida.
- Corrida de la simulación para el cálculo de distancias de afectación para los niveles de sobrepresión establecidos.
- Corrida de la simulación para el cálculo de distancias de afectación para los niveles de sobrepresión establecidos variando la intensidad de la explosión.
- Corrida de la simulación para el cálculo de distancias de afectación para los niveles de sobrepresión establecidos variando la ubicación del punto de ignición.
- Corrida de la simulación para el cálculo de distancias de afectación para los niveles de sobrepresión establecidos variando la ubicación del epicentro de la explosión.
- Análisis de cada una de las simulaciones corridas.

III.2.4 Cálculo de flujo másico de descarga empleando Phast y Hysys.

Se tomó como base una fuga en una tubería, se estudió la fuga de un líquido presurizado y un gas, se estudiaron fugas de ¼, 1, 4 y 16 pulgadas a través de simulaciones en Phast 6.54 y Hysys.

III.2.5 Establecimiento de Criterios Ingenieriles para la selección de parámetros en la determinación de tasas de fugas y cálculo de consecuencias de una Explosión por Nube de Vapor.

Con la finalidad de determinar los parámetros a evaluar, disminuir los tiempos de ejecución y darle facilidades de uso al software, se establecieron criterios que permitieron crear escenarios para evaluar la sobrepresión de una explosión por nube de vapor. En tal sentido, se revisaron cuidadosamente las ecuaciones de cálculo empleadas por el simulador. Posteriormente, se realizaron varias simulaciones variando cada uno de los parámetros críticos, que permitieron determinar los parámetros críticos con sus respectivos rangos.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en el modelado de una explosión por Nube de Vapor, empleando los modelos de Baker Strehlow Tang y TNO Multienergía, así como los resultados obtenidos para la descarga empleando Phast 6.53 y Hysys, demostrando así el logro de los objetivos planteados en este trabajo especial de grado.

IV.1 Métodos abreviados.

El método abreviado obtenido de las principales bibliografías de análisis cuantitativo de riesgo es el siguiente:

IV.1.1 Método TNT EQUIVALENTE.

El modelo TNT equivalente se basa en el supuesto de equivalencia entre el material inflamable y el TNT, multiplicado por una eficiencia de la explosión (CPPS, 2003). Las ecuaciones empleadas por este modelo son las siguientes:

La relación entre la energía liberada, sea cual fuese su origen (explosivo, nube o depósito), y la masa de TNT equivalente (W_{TNT} , en Kg) se establece mediante la siguiente relación (CPPS, 2003):

$$W_{TNT} = \alpha \frac{E_{exp}}{H_{TNT}} \dots \text{Ec. 16}$$

Donde:

W_{TNT} = Masa de TNT equivalente (Kg)

α = Eficiencia de la explosión (adimensional)

E_{exp} = Energía liberada en la explosión (J)

H_{TNT} = Calor de combustión del TNT (J/Kg)

Una vez conocida la masa de TNT equivalente se determina la distancia escalada, Z, mediante (Van den Bosh, 1996):

$$Z = \frac{R}{W_{TNT}^{1/3}} \dots \text{Ec. 17}$$

Donde:

Z= Distancia escalada con la cual se obtiene la presión escalada e impulso escalado (ver figura 12) (m/Kg^{1/3}).

R= Distancia desde el origen de la explosión al punto donde se desee estimar la sobrepresión o el impulso (m).

Con la distancia escalada se obtiene el impulso escalado, y con este último el impulso mecánico mediante la expresión (Van den Bosh, 1996):

$$i_{TNT} = \frac{i}{W_{TNT}^{1/3}} \text{ Ec. 18}$$

Donde:

i_{TNT} = Impulso escalado de TNT (Pa.s/Kg^{1/3})

i = Impulso mecánico (Pa.s)

Análogo con la sobrepresión, mediante la expresión (CPPS, 2003):

$$P_s = \frac{P_o}{P_a} \text{ Ec.19}$$

Donde:

P_s = Sobrepresión lateral escalada (adimensional).

P_a = Presión atmosférica (bar).

P_o = Sobrepresión lateral generada (bar).

A continuación la figura N° 14, donde se muestra la distancia escalada versus presión escalada, duración de la fase positiva e impulso.

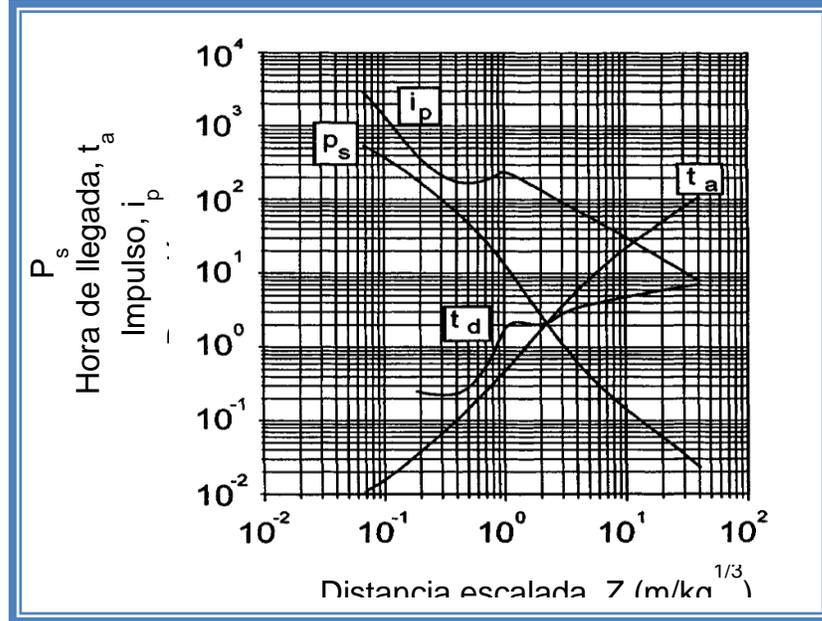


Figura N°14 distancia escalada vs Presión escalada, impulso escalado, duración de la fase positiva escalada (CPPS, 2003).

Este método se explica con más detalle en la revisión bibliográfica.

IV.2 Métodos Rigurosos

A continuación se muestra los modelos rigurosos de cálculo empleado por el software Phast 6.54, con sus respectivas modificaciones.

IV.2.1 Método TNO Multienergía.

Las ecuaciones empleadas por Phast 6.54 empleando el método TNO multienergía son las mostradas a continuación:

Etapla 1. Determinación de la masa, ubicación y volumen de la nube explosiva.

Phast 6.54 aplica un modelo de fuga y dispersión para determinar la masa de nube contenida entre los límites de inflamabilidad y ubicación de la misma.

El volumen de la nube explosiva se determina mediante la siguiente expresión (DNV, SF):

$$V^{Total} = \frac{m^{Combustible} \cdot v_{Especifico}^{Combustible}}{c_{Estequiometrica}^{Combustible}} \quad Ec.20$$

Donde:

V^{Total} = Volumen total de la nube (m^3).

$m^{Combustible}$: Masa total del combustible contenida entre los límites de inflamabilidad (Kg).

$V_{Específico}$ = Volumen específico del combustible (m^3/Kg).

$C_{Estequiométrica}^{Combustible}$ = Concentración estequiométrica (adimensional), calculado mediante la expresión:

$$C_s = \frac{n_{HC}}{n_{HC} + n_{O_2} + n_{N_2}} \quad \text{Ec.21}$$

Donde:

n = número de moles de cada una de las especies señaladas.

Etap 2. Determinación de las propiedades de los volúmenes especificados.

Masa de combustible.

La masa de combustible en un volumen confinado dado es calculada mediante (DNV, SF):

$$m_{conf\ i}^{Combustible} = f_{conf\ i} * m^{Combustible} \quad \text{Ec. 22}$$

$m_{conf\ i}^{Combustible}$ = masa de combustible en un volumen confinado dado (Kg).

$f_{conf\ i}$ = fracción de volumen confinado (adimensional), tomado directamente de la data de entrada o calculado mediante la siguiente expresión:

$$f_{conf\ i} = \frac{V_{conf\ i}}{V^{Total}} \quad \text{Ec. 23}$$

Donde:

$V_{conf\ i}$ = Volumen confinado (m^3).

La masa de combustible en el volumen no confinado restante se calcula como:

$$m_{No\ Confinado}^{Combustible} = (1 - \sum f_{conf\ i}) m^{fuel} \quad \text{Ec. 24}$$

Donde:

$m_{No\ Confinado}^{Combustible}$ = Masa de combustible no confinado (Kg).

Energía en los volúmenes de la nube

Energía de Combustión.

Para cada volumen (confinado o no confinado), el programa calcula la energía de combustión mediante la ecuación (DNV, SF):

$$E_{vol} = m_{vol}^{Combustible} * H_{combustion}^{Combustible} \quad \text{Ec. 25}$$

Donde:

$H_{combustión}$ = Calor de combustión estequiométrico (J/Kg).

E_{vol} = Energía de combustión para un volumen confinado dado (J).

m_{vol}^{fuel} = masa de combustible en un volumen confinado dado (Kg).

Factor escalar de la distancia.

Para cada volumen (confinado o no confinado), el programa calcula el factor escalar de la distancia mediante la siguiente ecuación (DNV, SF):

$$S_{vol} = \left(\frac{E_{vol}}{P_a}\right)^{\frac{1}{3}} \dots \text{Ec. 26}$$

Donde:

P_a = Presión atmosférica (Pa).

S_{vol} = Factor escalar de la distancia ((J/Pa)^{1/3}).

Sobrepresión frente a la distancia.

Para cada volumen (confinado o no confinado), el programa considera un conjunto de localizaciones igualmente espaciadas, en donde la distancia de un punto dado desde el centro de la explosión viene dado por (DNV, SF):

$$d_j = D^{Inicial} + (j - 1)D^{Paso} \quad \text{Ec. 27}$$

Donde:

d_j = Distancia desde el centro de la explosión (m)

$D^{Inicial}$ = Distancia donde ocurre la ignición (m).

D^{Paso} = Espacio entre las localizaciones (m).

Para un volumen dado (i), la distancia escalada en un punto dado (j) se calcula como (DNV, SF):

$$r_{ij} = \frac{d_j}{s_i} \quad \text{Ec. 28}$$

Donde:

r_{ij} = Distancia escalada (m(Pa/J)^{1/3})

El programa calcula la sobrepresión fraccional, P_{ij} , que es función de la fuerza del confinamiento y de la distancia escalada (DNV, SF), tal como se muestra en la tabla N°7:

Tabla N°7 Cálculo de la sobrepresión fraccional (DNV, SF).

Fuerza de confinamiento	Cálculo para P_{ij}		
1	P_{ij}	0,01	$r < 0,4$
		$10^{-22200-13924 \log r - 2,1970(\log r)^2}$	$1 \leq r < 6,247410$
		$10^{-22413-0,9535 \log r}$	$1 \leq r < 6,247410$
		0,001	$6,247410 < r$
2	P_{ij}	0,01	$r < 0,4$
		$10^{-1,8860-13073 \log r - 2,2789(\log r)^2}$	$0,4 \leq r < 1$
		$10^{-22413-0,9535 \log r}$	$1 \leq r < 6,247410$
		0,001	$11,904281 \leq r$
3	P_{ij}	0,05	$r < 0,4$
		$10^{-1,2596-1,7047 \log r - 2,7980(\log r)^2}$	$0,4 \leq r < 1$
		$10^{-1,2440-1,0051 \log r}$	$1 \leq r < 26,416391$
		0,001	$26,41639 \leq r$
4	P_{ij}	0,05	$r < 0,4$
		$10^{-1,2596-1,7047 \log r - 2,7980(\log r)^2}$	$0,4 \leq r < 1$
		$10^{-1,2440-1,0051 \log r}$	$1 \leq r < 55,858573$
		0,001	$55,858573 \leq r$
5	P_{ij}	0,02	$r < 0,4$
		$10^{-0,9586-1,6875 \log r - 2,7406(\log r)^2}$	$0,4 \leq r < 1$
		$10^{-0,9688-1,0016 \log r}$	$1 \leq r < 1000$
		0,001	$100 \leq r$

Continuación de la tabla N°7.

6	P_{ij}	0,05	$r < 0,4$
		$-0,31751r + 0,646888$	$0,4 < r \leq 1,1725$
		$0,3646868 / r^{1,24413}$	$1,1725 < r \leq 3,9888613$
		$0,2989028 / r^{110035}$	$3,9888613 \leq r < 100$
		0,01	$100 < r$
7	P_{ij}	1	$r < 0,4$
		$-1,00263r + 1,428792$	$0,4 < r \leq 0,843299$
		$0,4641838 / r^{1,44165}$	$0,843299 < r \leq 3,6315644$
		$0,2989028 / r^{110035}$	$3,6315644 \leq r < 100$
		0,01	$100 < r$
8	P_{ij}	2	$r < 0,3$
		$10^{-0,2038-2,0866 \log r-2,1441(\log r)^2}$	$0,3 < r \leq 0,55$
		$10^{-0,3059-1,7574 \log r-0,5952(\log r)^2-0,1656(\log r)^3}$	$0,55 < r \leq 5$
		$10^{-0,5233-1,1108 \log r}$	$5 \leq r < 100$
		0,01	$100 < r$
9	P_{ij}	5	$r < 0,3$
		$10^{0,0054-1,9815 \log r-1,3816(\log r)^2}$	$0,25 < r \leq 0,35$
		$10^{-0,3059-1,7574 \log r-0,5952(\log r)^2-0,1656(\log r)^3}$	$0,35 < r \leq 5$
		$10^{-0,5233-1,1108 \log r}$	$5 \leq r < 100$
		0,001	$100 < r$
10	P_{ij}	13	$r < 0,3$
		$10^{-0,2038-2,0866 \log r-2,1441(\log r)^2}$	$0,3 < r \leq 0,55$
		$10^{-0,3059-1,7574 \log r-0,5952(\log r)^2-0,1656(\log r)^3}$	$0,55 < r \leq 5$
		$10^{-0,5233-1,1108 \log r}$	$5 \leq r < 100$
		0,01	$100 < r$

La sobrepresión entonces viene dada por (DNV, SF):

$$P_{ij} = p_{ij}P_a \quad \text{Ec. 28}$$

Donde:

P_{ij} = Sobrepresión generada (Pa).

p_{ij} = Sobrepresión fraccional (adimensional).

Las ecuaciones empleadas por Phast 6.54 son equivalentes a las reportadas en la literatura, sin embargo estas últimas están basadas en graficas obtenidas por modelación numérica, mientras que las ecuaciones utilizadas por Phast hacen uso de ajustes exponenciales de los datos contenidos en las gráficas mencionadas.

IV.2.3 Baker Strehlow Tang.

Phast 6.54 emplea el siguiente algoritmo de cálculo para este modelo:

Etapa 1. Calculo de la Energía de la Explosión.

La energía de la explosión se calcula con la ecuación N°29.

$$E_{exp} = m_{exp} * R_{Tierra} * H_{Combustión} \quad \text{Ec.29}$$

Donde:

E_{exp} = Energía de la explosión (J).

m_{exp} = masa inflamable total del material (Kg).

R_{Tierra} = Factor reflexión de tierra (adimensional).

$H_{Combustión}$ = Calor de combustión del material (J/Kg).

Etapa 2. Velocidad del sonido en el aire.

Asumiendo que el aire tiene un comportamiento ideal a condiciones ambientales, la velocidad del sonido viene dada por:

$$V_{sónido} = \sqrt{\frac{\gamma_{aire} * R_g * T_{amb}}{M_{aire}}} \quad \text{Ec. 30}$$

Donde:

v_{sound} = Velocidad del sonido en el aire (m/s).

γ_{aire} = Relación de calores específicos para el aire (adimensional).

M_{aire} = Peso molecular del aire (Kg/Kmol).

T_{amb} = Temperatura ambiente (K).

Etapa 3. Velocidad de la llama o Número de Match.

Si el usuario proporciona un valor para el número de Match, el programa usa ese valor directamente. De lo contrario, el cálculo de ese valor se describe a continuación:

Etapa 3.1 Velocidad de la llama Lagrangiana.

El programa primero obtiene la velocidad de la llama lagrangiana, que se refiere a la velocidad de adición de calor seguido de la ignición, medida con relación a un observador fijo. Esta velocidad es función de la geometría, reactividad del material y de la densidad de obstáculos. Estos valores son tomados de la data de entrada, y la velocidad de la llama se obtiene a partir de la tabla N°8, mostrada a continuación:

Tabla N°8 Velocidad de la llama para el modelo Baker Strehlow Tang (DNV, 2010).

Grado de Confinamiento	Reactividad del material	Congestión		
		Baja	Media	Alta
2D	Alta	0,59	DDT	DDT
	Media	0,47	0,66	1,6
	Baja	0,079	0,47	0,66
2.5D	Alta	0,47	DDT	DDT
	Media	0,29	0,55	1
	Baja	0,053	0,35	0,5
3D	Alta	0,36	DDT	DDT
	Media	0,11	0,44	0,5
	Baja	0,026	0,23	0,34

Etapa 3.2 Velocidad de la llama Euleriana.

Las curvas Baker Strehlow Tang describen el comportamiento de explosiones como función de la velocidad de la llama eurliana, que se refiere a la velocidad de adición de calor seguido de la ignición, medida con relación a un observador fijo.

El modelo Baker Strehlow Tang usa una relación simple y directa entre la velocidades de llama Lagrangiana y Eurliana, y el programa obtiene el valor de la velocidad de la llama eurliana de la tabla N°9, haciendo interpolación lineal cuando

sea necesario para obtener la velocidad de la llama euleriana para un valor intermedio de velocidad de llama Lagrangiana.

Tabla N°9 Conversión de Velocidad Lagrangiana a Euleriana (DNV, SF).

Número de Mach	
Lagrangiana	Euleriana
0,037	0,070
0,074	0,120
0,125	0,190
0,250	0,350
0,500	0,700
0,750	1,000
1,000	1,400
2,000	2,000

Etapa 4. Obtención del comportamiento de la explosión desde la curvas.

Para mayor precisión, los datos extraídos de las gráficas publicadas para cada curva de velocidad de llama han sido separados en tres regiones con su respectivo ajuste, dichas tablas están ilustradas en la ayuda del software Phast 6.54 (Dar F1 e ir a cálculos modelo Baker Strehlow tang).

A través del ajuste de las gráficas se obtiene la sobrepresión escalada (P_s) e impulso escalado (I_s) con estos se obtiene la sobrepresión lateral generada e impulso respectivo mediante el uso de las siguientes ecuaciones:

$$R_s = \frac{R}{(P_{amb})^{1/3}} \text{ Ec. 31}$$

Donde:

R_s = Distancia escala (m/(j/Pa)^{1/3})

R = Distancia desde el centro de la explosión (m).

E_{exp} = Energía de la explosión (J).

P_{amb} = Presión ambiente (Pa).

Una vez calculada la distancia escalada el programa calcula Sobrepresión e impulso mediante el uso de las siguientes dos ecuaciones:

$$P_s = \frac{P}{P_{amb}} \text{ Ec.32}$$

Donde:

P_s = Sobrepresión escalada (adimensional).

P_{amb} = Presión ambiente (Pa).

P = Sobrepresión generada (Pa).

El impulso se calcula mediante la siguiente expresión:

$$I_s = \frac{I v_{\text{sonido}}}{P_a \left(\frac{E}{P_a}\right)^{\frac{1}{3}}} \text{ Ec.33}$$

Donde:

I_s = impulso escalado (adimensional).

I = Impulso

v_{sonido} = Velocidad del sonido en el aire (m/s).

Las ecuaciones utilizadas por el modelo Baker Strehlow Tang empleadas en Phast 6.54 se corresponde con las publicadas en la bibliografía consultada ((CPPS,2003), (Van den Bosh, 2006)), las mejoras aportadas por el software son el ajuste de las curvas, inclusión del factor de reflexión de tierra en el cálculo de la energía involucrada en la explosión y el cálculo de la velocidad del sonido en el aire que en los libros consultados lo toman como 340m/s, mientras que el software permite calcularla mediante la ecuación N°30.

IV.3 Cálculo de las distancia de afectación para los niveles de sobrepresión fijados empleando un modelo simplificado y modelos mejorados.

- **Definición del escenario a ser evaluado.**

La terminal de LPG PEMEX, de 16.000m³ de capacidad, ubicada en San Juan Ixhuatepec en las afueras de Ciudad de México, se suministra regularmente de tres refinerías. El 19 de Noviembre de 1984 a las 5:35 am, la sala de control notificó una caída de presión en la estación de bombeo, sin encontrar su causa. Una tubería de 8 pulgadas de diámetro entre un tanque de almacenamiento esférico y grupo de

- 4 tanques de almacenamiento esférico de 14,5 metro de diámetro.
- 5 tanques de almacenamiento cilíndrico de 2 metro de diámetro y 19 metro de longitud.
- 3 tanques de almacenamiento cilíndrico de 2 metro de diámetro y de longitud 16 metros.
- 21 tanques de almacenamiento cilíndricos de 2 metro de diámetro y longitud 13m.
- 14 tanques de almacenamiento cilíndrico de 3,5 metro de diámetro y longitud 21 metro.
- 4 tanques de almacenamiento cilíndrico de diámetro 3,5 metro y longitud 32 metro

La altura mínima por debajo de los tanques 2 metros y la altura de las tuberías por encima de los tanques de almacenamiento son de 0,5 metro.

- Establecimiento de las condiciones meteorológicas.

Las condiciones meteorológicas usadas para la estimación de consecuencias fueron supuestas ya que el escenario base no especificaba con exactitud la misma por lo que se asumió para el propósito de este estudio la siguiente categoría de velocidad de viento (m/s) y clasificación de Estabilidad de Pasquil: 1,5D.

- Estimación de las condiciones de Proceso: Temperatura, Presión e inventario.

Las condiciones del proceso no estaban especificada en el escenario base por lo que se estableció un líquido presurizado con una temperatura de aproximadamente 50°C y una presión de 18,74 bar.

- Corrida de una simulación preliminar en orden a estimar la dispersión de la nube sobre la planta.

La figura N° 16 muestra la dispersión de la Nube a las condiciones establecidas.

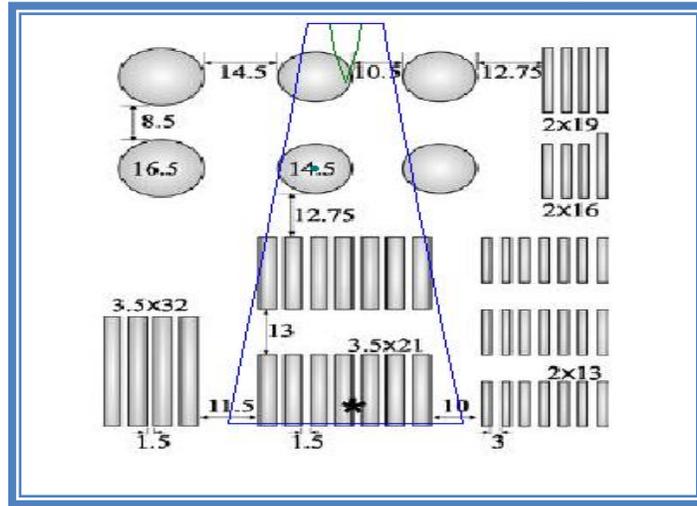


Figura N° 16 Dispersión de la nube a las condiciones establecidas.

- Cálculo del volumen de la nube.
El volumen de la nube calculado se estimó en 4396,68 m² (Ver Anexo C).
- Definición de las regiones obstruidas y cálculo de sus respectivos volúmenes.

Una región obstruida es aquella en la que hay una elevada densidad de objetos, equipos y/o edificaciones (Assael y Kakosimos, 2010).

El procedimiento de construcción de una región obstruida se basa sobre el efecto que los obstáculos tienen en la generación de turbulencia. El espacio alrededor del centro de la explosión se separa en regiones obstruidas y no obstruidas. La nube solo puede extenderse en el espacio libre en cada una de las regiones obstruidas (Assael y Kakosimos, 2010).

Dos reglas empíricas han sido propuestas en orden para incluir o no un nuevo objeto en una región obstruida. Más específicamente, la distancia, X (m), entre cada nuevo objeto y su anterior deberán cumplir las siguientes dos condiciones (Van den Bosh, 1996):

c) $X < 25 m$ Ec. 34

$$d) X < 10D_1 \text{ ó } X < 1,5D_2 \dots \text{Ec.35}$$

Los Tanques de almacenamiento, sus dimensiones y el centro de la explosión se muestran en la figura N°16. Para que un nuevo objeto sea parte de una región obstruida, su distancia del objeto anterior debe satisfacer las ecuaciones N°34 y N°35, donde D_1 (m) es la dimensión más pequeña del objeto perpendicular a la dirección de propagación de la llama, mientras D_2 (m) es la dimensión del objeto que es paralelo a la dirección de propagación de la llama.

Comenzando desde el punto de ignición (*), el primer tanque cilíndrico a la derecha se considera. Esta a una distancia de 1,5 m del anterior (<25m) y además esa misma distancia es más pequeña que $10D_1 = 10 \times 3,5 = 35\text{m}$. Lo mismo sigue para los dos próximos tanques de almacenamiento. Seguidamente, la distancia del primer tanque de almacenamiento del grupo de 2X13, a partir del último del grupo de 3,5X21, es 10 m <25 m, pero también menor que $10D_1 = 10 \times 2 = 20$. De igual forma, se puede ver fácilmente que todos los tanques de almacenamiento en la figura son parte de la misma región obstruida.

Aunque todos los tanques de almacenamiento pertenecen a la misma región obstruida (de acuerdo a los dos criterios anteriormente mencionados), hay diferentes cantidades de espacio vacío sobre cada grupo de tanques de almacenamiento. Por lo tanto se prefiere separar la región obstruida en tres regiones obstruidas distintas. En estas regiones el coeficiente de explosión será alto, mientras que en las otras será bajo.

Cada una de las regiones obstruidas se modela como una caja paralelepípedica tal como recomienda la mayoría de las bibliografías consultadas, el volumen de esas regiones se calcula usando la ecuación N° 7, como sigue:

$$\text{Región obstruida 1: } V_1 = (21) \times (7 \times 3,5 + 6 \times 1,5) \times (3,5 + 2 + 0,5) = 4221 \text{ m}^3$$

$$\text{Región obstruida 2: } V_2 = (21) \times (7 \times 3,5 + 6 \times 1,5) \times (3,5 + 2 + 0,5) = 4221 \text{ m}^3$$

$$\text{Región obstruida 3: } V_3 = \underline{(14,5) \times (14,5 \times 2 + 8,6) \times (14,5 + 2 + 0,5) = 9317,7 \text{ m}^3}$$

$$\text{Volumen total de la región Obstruida} = 17759,7 \text{ m}^3$$

Capacidad de almacenamiento de los tanques:

$$14 \times 201,94 \text{ m}^3 + 2 \times 1595,41 \text{ m}^3 = 6017,98 \text{ m}^3$$

Por lo tanto restando la capacidad de almacenamiento de los tanques, el espacio vacío para la dispersión de la nube, usando la ecuación N°8 es $V_{\text{obs}} = 17759,7 \text{ m}^3 - 6017,98 \text{ m}^3 = 11741,72 \text{ m}^3$

El espacio disponible para la dispersión de la nube dentro de la región obstruida fue de $11741,72 \text{ m}^3$, este volumen es más pequeño que el volumen de la nube que es $46165,14 \text{ m}^3$, lo que implica que el volumen de la nube que contribuirá al blast es el equivalente al disponible, el resto del volumen de la nube tendrá una intensidad de blast baja.

Otro criterio, es el recomendado por Baker Strehlow el cual establece como distancia de separación entre objetos 5m, de aplicarse este método se hubiesen obtenido dos regiones obstruidas con diferentes blast, lo cual se contradice con los resultados obtenidos en el caso estudio reportado en la bibliografía y por consiguiente aumenta el número de simulaciones.

- Definición de los niveles de sobrepresión a ser evaluados, los cuales fueron establecidos según lo reportado en la norma PDVSA IR-S-02 para planes de emergencia y contingencia

Los Niveles de sobrepresión a evaluar se muestran en la tabla N° 10, que se muestra a continuación:

Tabla N° 10. Niveles de Sobrepresión a Evaluar (PDVSA IR-S-02)

Nivel de Sobrepresión a evaluar (psig)	% de fatalidad (Adimensional)
0,73	1
2,47	50
3,05	99

TNT Equivalente:

- Establecimiento de la eficiencia de la explosión.

Se estableció una eficiencia del 10% según lo reportado en el criterio para la selección de la eficiencia mostrado en la tabla N°1.

- Establecimiento del factor de modificación de la masa.

Se estableció un factor de modificación de la masa de 2, ya que el modelo de explosiones sobre tierra es semiesférico.

- Corrida de la simulación para el cálculo de distancias de afectación para los niveles de sobrepresión establecidos.

A continuación se muestran las distancias de afectación obtenidas por el método TNT Equivalente.

Tabla N°11 Distancia de Afectación para Niveles de Sobrepresión a Evaluar.

Nivel de Sobrepresión a Evaluar (psig)	Distancia de Afectación (m)
0,73	484,61
2,47	309,14
3,05	291,84

Los resultados obtenidos por este método sirven para tener un estimado de los resultados obtenidos por el método TNO Multienergía y Baker Strehlow Tang, ya que el método TNT Equivalente no toma en cuenta la obstrucción.

TNO Multienergía:

- Definición de la intensidad de explosión inicial.

Para la selección de este parámetro se utilizó el criterio mostrado en la tabla N°2 de la revisión bibliográfica, tomándose un valor comprendido entre 7 y 10, tomándose 7 que representa el valor que se ajusta mejor a las condiciones.

- Corrida de la simulación para el cálculo de distancias de afectación para los niveles de sobrepresión establecidos.

La tabla N°12 muestra las distancias de afectación obtenidas por el método TNO Multienergía.

Tabla N°12 Distancia de Afectación para Niveles de Sobrepresión a Evaluar obtenidas por el método TNO.

Nivel de Sobrepresión a Evaluar (psig)	Distancia de Afectación (m)
0,73	552,97
2,47	311,87
3,05	292,64

- Corrida de la simulación para el cálculo de distancias de afectación para los niveles de sobrepresión establecidos variando la intensidad de la explosión.

A continuación se muestra la tabla N°13, donde se ilustran las distancias de afectación obtenidas por el método TNO Multienergía variando la intensidad de la explosión.

Tabla N° 13 Distancia de afectación variando la intensidad de la explosión para el método TNO Multienergía.

Criterio a evaluar	Intensidad de la explosión		
	10	7	3
Valor de la intensidad de la explosión (Adimensional)			
Nivel de Sobrepresión a Evaluar (psig)	Distancia de afectación		
0,73	552,81	552,97	213,30
2,47	311,95	311,87	0,00
3,05	292,62	292,64	0,00
Masa incendiable (Kg)	3209,95	3209,95	3209,95

Se puede observar que un valor de intensidad de explosión comprendido entre 7 y 10 arroja distancias de afectación similares, mientras que cuando se utiliza un valor de intensidad de explosión bajo no se alcanzan valores de sobrepresión altos ya

que valores de intensidad bajo corresponden a deflagraciones, por lo que se recomienda usar un valor comprendido entre 7 y 10 para detonaciones y un valor de 3 para deflagraciones, una selección más detallada de este parámetro se puede ver con más detalle en la Tabla N°2 de la revisión bibliográfica.

A continuación se ilustra en la figura N°17 las distancias de afectación para las sobrepresiones fijadas para una intensidad de explosión de 7.

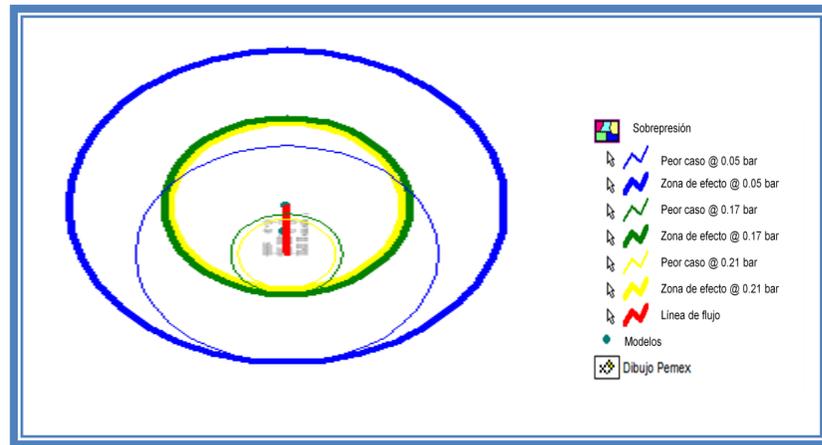


Figura N° 17. Distancias de afectación para los niveles de sobrepresión fijados para el método TNO Multienergía con una intensidad de explosión de 7.

Las gráficas correspondientes para una intensidad de explosión de 3 y 10 pueden observarse en el Anexo D.

- Corrida de la simulación para el cálculo de distancias de afectación para los niveles de sobrepresión establecidos variando la ubicación la ubicación del punto de ignición.

A continuación se muestra la tabla N°14, donde se ilustran las distancias de afectación obtenidas por el método TNO Multienergía variando la Ubicación del punto de ignición.

Tabla N° 14 Distancia de afectación variando la ubicación del punto de ignición para el método TNO Multienergía.

Criterio a evaluar	Ubicación del punto de ignición		
Ubicación del punto de ignición (m)	170	130	100
Nivel de Sobrepresión a Evaluar (psig)	Distancia de afectación		
0,73	552,81	510,73	480,73
2,47	311,95	271,87	241,87
3,05	292,64	252,64	222,64
Masa Incendiable (Kg)	3209,95	2068,29	1328,46

Se puede observar que la ubicación del punto de ignición tiene gran influencia en el tamaño de la nube inflamable que se encuentra entre los límites inferior y superior de flamabilidad como se observa en la tabla N°11, ya que el programa asume que hay puntos de ignición en el momento que la nube se desplaza en la dirección del viento y por lo tanto la masa total de la nube será la formada hasta esa distancia, observándose que el modelo recipiente-tubería no permite ubicar con precisión puntos una vez formada la nube, lo cual representa una desventaja del modelo, ya que en el caso de que la nube al viajar no encuentra puntos de ignición y que esto se produzcan una vez formada la nube, debido a una chispa ó encendido de un fósforo por ejemplo, en un punto específico y se desee dar ese punto, el software no tomaría en muchos casos el verdadero volumen confinado.

A continuación en la figura N°18, se muestran las distancias de afectación ubicando el punto de ignición a 170 m desde la fuga

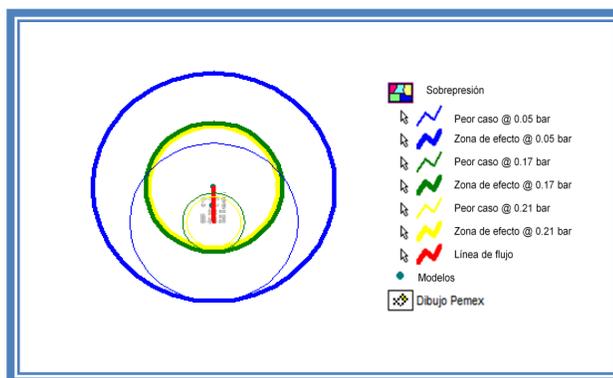


Figura N° 18 Distancias de afectación para los niveles de sobrepresión fijados para el método TNO Multienergía con ubicación del punto de ignición a 170 m desde la liberación.

Las graficas correspondientes ubicando el punto de ignición a 130m y 100m respectivamente se pueden ver en el Anexo D.

- Corrida de la simulación para el cálculo de distancias de afectación para los niveles de sobrepresión establecidos variando la ubicación del epicentro de la explosión.

A continuación se muestra la tabla N°15, donde se ilustran las distancias de afectación obtenidas por el método TNO Multienergía variando el epicentro de la explosión.

Tabla N° 15 Distancia de afectación variando la ubicación del epicentro de la explosión para el método TNO Multienergía.

Criterio a evaluar	Ubicación del epicentro de la explosión		
	Front cloud (LFL)	Centroide	Front Cloud (fracción LFL)
Epicentro de la explosión (adimensional)			
Nivel de Sobrepresión a Evaluar (psig)	Distancia de afectación		
0,73	552,81	465,73	552,81
2,47	311,95	226,87	311,95
3,05	292,64	207,64	292,64
Masa Incendiable (Kg)	3209,95	3209,95	3209,95

Como se muestra en la Tabla N°15 la ubicación del epicentro de la explosión no influye en el cálculo de la masa de la nube, pero dependiendo donde se coloque el epicentro el programa comenzará a medir las distancias de afectación, como por lo general se ubica el centro de la explosión en el punto de ignición se establece como criterio seleccionar como epicentro de la explosión en Front Cloud para que de esta manera el programa ubique el centro de la explosión en el punto de ignición. En caso de colocarse como epicentro el centroide, el programa calculara las distancias de afectación a partir del punto medio desde la liberación al punto de ignición, como se muestra en la figura N°19.

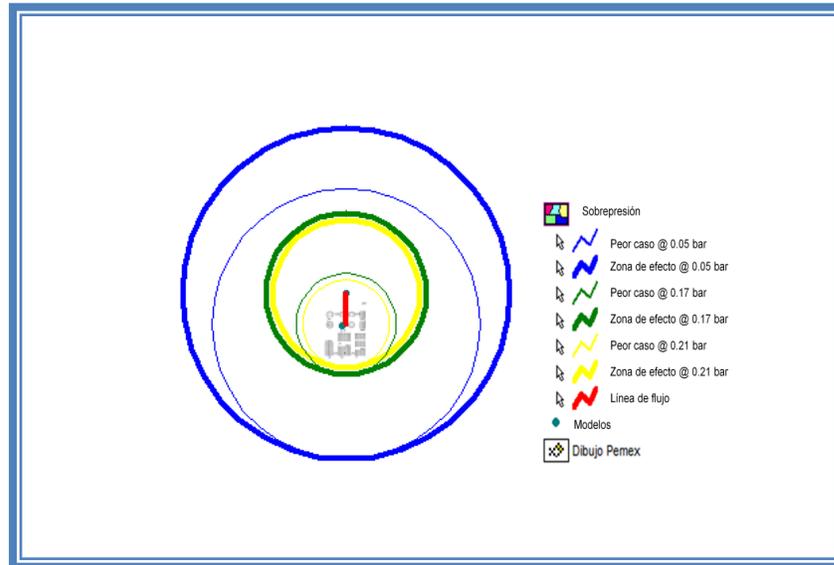


Figura N°19. Distancias de afectación ubicando el epicentro en el centro de la nube.

Baker Strehlow Tang.

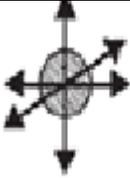
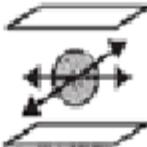
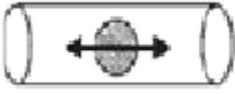
- Definición de la reactividad de la sustancia.

La reactividad de la sustancia se estableció en media según lo reportado en el criterio para la selección de este parámetro mostrado en la revisión bibliográfica en la sección del modelo Baker Strehlow Tang, donde se establece que el metano y monóxido de carbono son los materiales considerados de baja reactividad, mientras el hidrógeno, acetileno, etileno, óxido de etileno y propileno son de alta reactividad, el resto de los materiales tienen reactividad media.

- Definición del grado de expansión de la llama.

Se definió un grado de expansión de la llama de 2,5D, para cada una de las regiones obstruidas ya que la misma se puede expandir en las tres direcciones según lo reportado en el criterio de selección de este parámetro reportado en la tabla N°16 de la revisión bibliográfica.

Tabla N°16 Grado de expansión de la llama (CPPS, 2003)

Dimensión	Descripción	Geometría
3D	Volumen no confinado, casi completamente libre de expansión	
2.5D	Bastidores de tubería densa	Entre 3D y 2D
2D	Plataformas que transportan equipos de procesos, edificios de varios pisos con espacios abiertos	
1D	Túneles, corredores o sistema de alcantarillado.	

Debido a que se tiene una única región obstruida y que está a su vez fue dividida en tres regiones obstruidas, se cálculo un grado de expansión promedio mediante el uso de la ecuación N°14

$$\bar{C}_f = \frac{\sum_{i=1}^{Nobstr} V_{gr,i} * C_{f,i}}{\sum_{i=1}^{Nobstr} V_{gr,i}} \quad \text{Ec.14}$$

Donde:

$Nobstr$ = Número de regiones obstruidas en una fuente de explosión (adimensional).

$V_{gr,i}$ = Volumen de la nube en la región obstruida (m^3).

$C_{f,i}$ = Valor correspondiente al nivel de confinamiento para la región obstruida i . (adimensional).

\bar{C}_f = Confinamiento neto de la fuente de explosión.

Sustituyendo cada uno de los volúmenes obstruidos con su respectivo nivel de confinamiento en la ecuación N°14, se obtuvo que el confinamiento neto de la fuente de explosión sea:

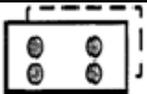
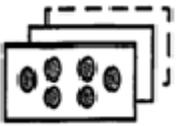
$$\bar{C}_f = \frac{\sum_{i=1}^{Nobstr} V_{gr,i} * C_{f,i}}{\sum_{i=1}^{Nobstr} V_{gr,i}} = \frac{6125,19 * 2,5 + 2806,7 * 2,5 + 2806,7 * 2,5}{11738,59} = 2,5$$

Haciendo uso de la tabla N°5, descrita en la revisión bibliográfica, se establece un nivel de confinamiento de 2,5D para la región obstruida.

- Cálculo de la densidad de obstáculos de la región obstruida.

Al igual que para el nivel de confinamiento neto, se procedió de la misma manera con el cálculo de la densidad de obstáculos, se cálculo la relación de volumen bloqueado para cada una de las regiones obstruidas y mediante el uso de la tabla N°17, se estableció el nivel de congestión para cada una de las regiones obstruidas que conforman la fuente de explosión.

Tabla N°17 Densidad de Obstáculos para el modelo de Baker Strehlow Tang (CPPS, 2003)

Tipo	Relación de Volumen bloqueado	Relación de Área Bloqueada	Filas para capas de obstáculos.	Geometría
Baja	Menos 0,06 %	Menos de 10%	Una o dos capas de obstáculos	
Media	Entre 0,06 % y 0,8 %	Entre 10% y 40%	Dos a tres capas de obstáculos	
Alta	Más de 0,8%	Más de 40%	Tres o más capas de obstáculos poco espaciadas	

Para cada una de las regiones obstruidas se calculo el volumen bloqueado mediante la ecuación N°34 mostrada a continuación:

$$VBR = \frac{V_{obsti}}{v_{ti}} \times 100 \quad \text{Ec. 34}$$

Donde:

VBR: Relación de Volumen bloqueado (adimensional).

Vobsti: Volumen total de los obstáculos de la región obstruida i.

Vti: Volumen total de la región obstruida.

La relación de bloqueo y correspondiente valor de densidad de obstáculos para cada una de las regiones obstruidas son las siguientes:

$VBR_1 = \frac{V_{obsti}}{V_{ti}} \times 100 = \frac{1414,3}{4221} \times 100 = 33,5\%$, lo cual corresponde a una densidad de obstáculo media según la tabla N°17.

$VBR_2 = \frac{V_{obsti}}{V_{ti}} \times 100 = \frac{1414,3}{4221} \times 100 = 33,5\%$, lo cual corresponde a una densidad de obstáculo media según la tabla N°17.

$VBR_3 = \frac{V_{obsti}}{V_{ti}} \times 100 = \frac{3192,51}{9317,7} \times 100 = 34,26\%$, lo cual corresponde a una densidad de obstáculo media según la tabla N°17.

Luego para el cálculo del nivel de congestión neto (densidad de obstáculo) se hizo uso de la ecuación N° 15

$$\overline{VBR} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{obstr}} V_{obsti}}{\sum_{i=1}^{N_{obstr}} V_{or,i}} \quad \text{Ec.15}$$

Donde:

V_{obsti} = Volumen total de los obstáculos de la región i (m³).

$V_{or,i}$ = Volumen de la región obstruida i (m³).

\overline{VBR} = Relación de volumen bloqueado (adimensional).

Sustituyendo cada uno de los volúmenes y nivel de congestión de cada una de las regiones obstruidas se obtuvo:

$\overline{VBR} = \frac{1414,3+1414,3+3192,51}{17759,7} = 0,33$ haciendo uso de la tabla N°17 se tiene una densidad de obstáculos alta.

- Corrida de la simulación para el cálculo de distancias de afectación para los niveles de sobrepresión establecidos.

A continuación se muestra la tabla N°18, donde se reflejan las distancias de afectación obtenidas por el método Baker Strehlow Tang.

Tabla N°18 Distancia de Afectación para Niveles de Sobrepresión a Evaluar obtenidas por el método Baker Strehlow Tang.

Nivel de Sobrepresión a Evaluar (psig)	Distancia de Afectación (m)
0,73	674,72
2,47	347,62
3,05	312,47

- Corrida de la simulación para el cálculo de distancias de afectación para los niveles de sobrepresión establecidos variando la ubicación la ubicación del punto de ignición.

A continuación se muestra la tabla N°19, donde se reflejan las distancias de afectación obtenidas por el método TNO Baker Strehlow Tang variando el punto de ignición.

Tabla N° 19 Distancia de afectación variando la ubicación del punto de ignición para el método Baker Strehlow Tang.

Criterio a evaluar	Ubicación del punto de ignición		
Ubicación del punto de ignición (m)	170	130	100
Nivel de Sobrepresión a Evaluar (psig)	Distancia de afectación		
0,73	638,46	598,46	568,46
2,47	339,46	299,46	269,46
3,05	311,04	271,04	241,04
Masa Incendiable (Kg)	3209,95	2049,20	1328,46

La ubicación del punto de ignición en el modelo Baker Strehlow Tang tiene el mismo impacto que para el modelo TNO Multienergía, para mayor entendimiento ver discusión de la tabla N° 14.

La figura N°20, muestra las distancias de afectación para un punto de ignición ubicado a 170 m de la liberación.

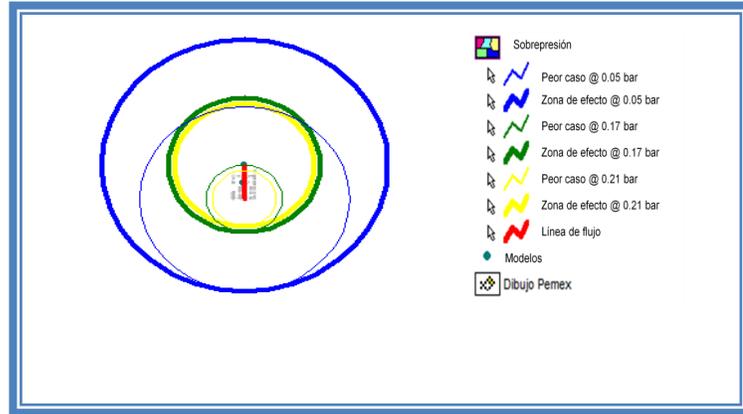


Figura N°20 Distancias de afectación ubicando el punto de ignición a 170 m de la liberación.

- Corrida de la simulación para el cálculo de distancias de afectación para los niveles de sobrepresión establecidos variando la ubicación del epicentro de la explosión.

A continuación se muestra la tabla N°20, donde se reflejan las distancias de afectación obtenidas por el método Baker Strehlow Tang variando el epicentro de la explosión.

Tabla N° 20 Distancia de afectación variando la ubicación del epicentro para el método Baker Strehlow Tang.

Criterio a evaluar	Ubicación del epicentro de la explosión		
	Front cloud (LFL)	Centroide	Front Cloud (fracción LFL)
Epicentro de la explosión (adimensional)			
Nivel de Sobrepresión a Evaluar (psig)	Distancia de afectación		
0,73	638,46	553,46	638,46
2,47	339,46	254,46	339,46
3,05	311,04	226,04	311,04
Masa Incendiable (Kg)	3209,95	3209,95	3209,95

Como se muestra en la Tabla N°20 la ubicación del epicentro de la explosión no influye en el cálculo de la masa de la nube, como ocurre en el modelo TNO multienergía, pero dependiendo donde se coloque el epicentro el programa comenzará

a medir las distancias de afectación, como por lo general se ubica el centro de la explosión en el punto de ignición se establece como criterio seleccionar como epicentro de la explosión en Front Cloud para que de esta manera el programa ubique el centro de la explosión en el punto de ignición.

La figura N°21 muestra las distancias de afectación ubicando el epicentro de la explosión en el frente del límite inferior de flamabilidad.

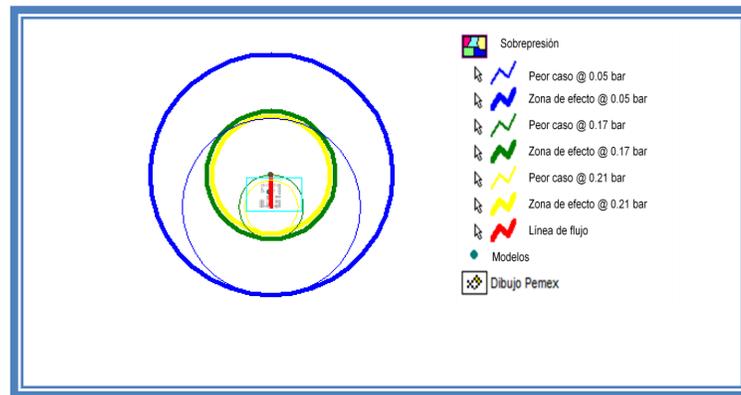


Figura N°21. Distancias de afectación para una explosión cuyo epicentro se ubica en el frente del límite inferior de flamabilidad.

Comparación de las distancias de afectación obtenidas por los métodos TNT Equivalente, TNO Multienergía y Baker Strehlow Tang.

A continuación la tabla N°21, donde se ilustran las distancias de afectación obtenidas por los diferentes modelos de cálculo de consecuencias para una explosión por nube de Vapor.

Tabla N°21 Distancias de Afectación para los diferentes Modelos de Explosión.

Nivel de Sobrepresión a Evaluar (psig)	Distancia de Afectación		
	Modelo TNT	Modelo TNO	Modelo Baker Strehlow Tang
0,73	484,61	552,81	674,72
2,47	309,14	311,95	347,62
3,05	291,84	292,64	312,47

Las diferencias entre los resultados obtenidos con los métodos TNO Y Baker Strehlow Tang puede ser explicado por las diferencias en el proceso de cálculo empleado por TNO y BST. Para el Método TNO Multienergía la selección de la intensidad de la explosión se deja a discreción del usuario y es menos guiado, mientras que en el Baker Strehlow Tang, La selección del número de Mach es altamente guiada, sin embargo ambos resultados presenta discrepancias a distancias más lejanas desde el centro de la explosión mientras que en distancia cercanas al centro de la explosión los resultados son muy similares.

III.2.4 Cálculo de flujo másico de descarga empleando Phast y Hysys.

Las tablas N°22 y 23, muestran los flujos másicos obtenidos mediante Phast y Hysys para diferentes tamaños de fuga, para los casos líquido y gas.

Tabla N° 22. Flujos másicos para condiciones de almacenamiento T: 50°C y P: 21,01 bar, obtenidos con Phast 6.54 y Hysys.

Diámetro del agujero	Phast 6.54		Hysys	
	Flujo másico (Kg/s)	Presión Choque (bar)	Flujo Másico (Kg/s)	Presión Choque (bar)
1/4´	0,86	1	0,55	13,88
1´´	13,87	1	4,86	13,88
4´´	221,4	1	78,33	13,88
16´´	3542,45	1	1234,72	13,88

Tabla N° 23. Flujos másicos para condiciones de almacenamiento T: 150°C y P: 21,01 bar, obtenidos con Phast 6.54 y Hysys.

Diámetro del agujero	Phast 6.54		Hysys	
	Flujo másico (Kg/s)	Presión Choque (bar)	Flujo Másico (Kg/s)	Presión Choque (bar)
1/4´	0,13	12,53	0,10	8,68
1´´	2,18	12,53	1,66	8,60
4´´	34,8	12,53	26,39	8,74
16´´	558,33	12,53	422,22	8,74

Se puede observar en ambas tablas que los software calculan la descarga hasta una presión de choque que algunas veces es la presión atmosférica, las diferencias en los flujos calculado por ambos software aumentan con el aumento del tamaño del orificio este es debido a que el modelo de orificio es eficiente para fugas pequeñas ($1'$ y $3/4'$), otra de las razones a las cuales se deben las diferencias en los resultados es que Phast emplea una trayectoria isentropica, es decir, que no toma en cuentas las pérdidas, mientras Hysys emplea una trayectoria isoentálpica, de allí que los flujos obtenidos por este software sean menores.

III.2.5 Establecimiento de Criterios Ingenieriles para la selección de parámetros en la determinación de tasas de fugas y cálculo de consecuencias de una Explosión por Nube de Vapor.

Evidentemente en la revisión bibliográfica están establecidos los criterios para la selección de parámetros en el cálculo de consecuencias, sin embargo lo que se observa es que hay criterios que presentan ambigüedades, entre ellos están:

1. Definición de Regiones obstruidas:

En la selección de las regiones obstruidas se recomienda usar el criterio establecido por Van den Bosh, quien estableció dos reglas que debe cumplir un objeto para poder pertenecer a una región obstruida las cual son:

$$a) X < 25 m \quad \text{Ec. 5}$$

$$b) X < 10D_1 \quad \text{ó} \quad X < 1,5D_2 \quad \text{Ec.6}$$

Donde $D_1(m)$ es la dimensión más pequeña del objeto perpendicular a la dirección de propagación de la llama, mientras $D_2(m)$ es la dimensión del objeto que es paralelo a la dirección de propagación de la llama.

Se recomienda este criterio ya que el mismo está bien documentado en la bibliografía y fue desarrollado por la TNO que es una empresa con bastante trayectoria en el área, mientras que con el otro criterio propuesto por Baker Strehlow que establece una distancia de separación de 5 m no está muy documentado en la

bibliografía y en caso de usarse este se estaría aumentando el número de simulaciones y para el caso estudiado los resultados obtenidos hubiesen sido contradictorios.

2. Nivel de Confinamiento

Este criterio tiene cierta ambigüedad cuando se tiene una fuente de explosión compuesta por varias regiones obstruidas, en muchos casos los ingenieros separan en varias fuentes cuando se tiene nivel de confinamiento distintos, por lo que se recomienda usar el criterio establecido por Baker Strehlow Tang quien dice que se puede calcular un nivel de confinamiento neto mediante el uso de la ecuación N°14 y Tabla N°6 mostradas a continuación:

$$\overline{C}_f = \frac{\sum_{i=1}^{N_{obstr}} V_{gr,i} * C_{f,i}}{\sum_{i=1}^{N_{obstr}} V_{gr,i}} \quad \text{Ec.14}$$

Donde:

N_{obstr} = Número de regiones obstruidas en una fuente de explosión (adimensional).

$V_{gr,i}$ = Volumen de la nube en la región obstruida (m^3).

$C_{f,i}$ = Valor correspondiente al nivel de confinamiento para la región obstruida i. (adimensional).

\overline{C}_f = Confinamiento neto de la fuente de explosión.

CONCLUSIONES

- La selección de la intensidad de la explosión representa una de las debilidades del modelo TNO Multienergía.
- La ubicación del punto de ignición determina la masa de la nube inflamable que se encuentra entre los límites inferior y superior de flamabilidad.
- El modelo TNT puede considerarse como un método abreviado en el cálculo de consecuencias de una Explosión por Nube de Vapor.
- Las curvas características, que permiten conocer directamente las magnitudes peligrosas del modelo TNO Multienergía no están validadas experimentalmente.
- Las curvas características, que permiten conocer directamente las magnitudes peligrosas del modelo Baker Strehlow Tang están validadas experimentalmente.
- El modelo Baker Strehlow Tang considera el Factor de Reflexión de Tierra en el cálculo de la energía de la explosión a diferencia del modelo TNO Multinergia.
- El modelo TNO no toma en cuenta la reactividad en la selección de la intensidad de la explosión.
- Las ecuaciones de los modelos de cálculo de consecuencias para Explosiones por Nube de Vapor empleadas por Phast se corresponden con las reportadas en la literatura especializada.
- Los mejores modelos disponibles para el cálculo de consecuencias de una Explosión por Nube de Vapor son los modelos fluidodinámicos.
- La selección del número de Mach para el modelo Baker Strehlow Tang está bien guiado.
- El modelo genérico usado por Phast para el cálculo de la tasa de fuga de descarga no toma en consideración las etapas del proceso, las operaciones

unitarias y los diferentes procesos fisicoquímicos que puedan ocurrir en esas operaciones.

- El modelo de orificio empleado por Phast para el cálculo de la descarga utiliza una trayectoria isentropica.
- El modelo de descarga empleado en Hysys utiliza una trayectoria isoentálpica.
- El modelo de orificio empleado por Phast se debe utilizar solo para fugas pequeñas (1" y ¾").
- El modelo Baker Strehlow Tang es mejor que el modelo TNO Multienergía.
- Los criterios que presentan más ambigüedades son: selección de regiones obstruidas y cálculo de grado de expansión de una llama para una fuente de explosión constituida por múltiples regiones obstruidas.

RECOMENDACIONES

- Establecer criterios ingenieriles para la selección de parámetros en el cálculo de distancias de afectación por radiación térmica y dispersión de nubes tóxicas.
- Revisar el modelo de dispersión empleado por Phast 6.54 (UDM).
- Establecer criterios ingenieriles en el cálculo de radiación debido a una bola de fuego, un Jet Fire y Poolfire.
- Estudiar la influencia del factor de modificación de la masa en el cálculo de la masa explosiva.
- Comparar los modelos de cálculos de distancia de afectación por radiación, sobrepresión y mezclas tóxicas de Phast con los empleados por Canary.
- Comparar los modelos de cálculo de descarga empleado por Phast con los empleados por Canary.
- Comparar los modelos empleados por Phast con los empleados por Canary.

BIBLIOGRAFÍA

1. Álvarez, E. (2006). Explosiones. Obtenida el 26 de Junio de 2012, de http://www.fi.uba.ar/archivos/posgrados_apuntes_Explosiones
2. Arias G., *Fidias* (1999). El proyecto de investigación: Guía para su elaboración. 3aed. Ediciones Episteme, Caracas, Venezuela.
3. Assael, M. y Kakosimos, K. (2010). Fires, Explosions, and Toxic Gas Dispersions, Boca Raton: CRC Press. 346p.
4. Balestrini, Miriam; *Cómo se elabora el Proyecto de Investigación*, Venezuela, Consultores Asociados Servicio Editorial. Segunda edición, 1998, 222 pp
5. Center for Chemical Process Safety (CCPS), *Guidelines for chemical process quantitative risk analysis*, American Institute of Chemical Engineers (AIChE), New York, NY, 1994
6. Center for Chemical Process Safety (CCPS), *Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs*, American Institute of Chemical Engineers (AIChE), New York, NY, 1994
7. Crawl, D y Louvar J. (2002) *Chemical Process Safety, 2da ed. New Jersey: Prentice Hall PTR. 650p.*
8. *Guidelines for Use of Vapor Cloud Dispersion Models The CCPS Guidelines for the Use of Vapor Cloud Dispersion Models* , American Institute of Chemical Engineers (AIChE), New York, NY, 1983.
9. HURTADO BARRERA, Jacqueline. *Metodología de la Investigación Holística*. Venezuela: SYPAL-IUTC,. 2000, 8 pp.
10. John Baik, BP America, Inc., Houston, USA Vijay Raghunathan. *Consequence Modelling of LNG Marine Incidents*. DNV Consulting, Houston, USA Henk Witlox, DNV Software, London, UK.
11. Kiwa, S. (SF). Incendios y Explosiones. Obtenida el 26 de Junio de 2012, de <http://www.authorstream.com/Presentation/thayrav-475903-incendios-y-explosiones/>

12. *Manual de Trabajo de Grado de Especialización y Maestría y Tesis Doctorales*. (4a ed.). Caracas, Venezuela: Fedupel.
13. Phast Tutorial Manual.DNV SOFTWARE Palace House,3 cathedral Street,London SE19DE,UK
14. PDVSA - Manual de Ingeniería de Riesgos Volumen I. “Filosofía de Diseño Seguro”. IR-S-00.
15. PDVSA - Manual de Ingeniería de Riesgos Volumen I. “Criterios para el Análisis Cuantitativo de Riesgos”. IR-S-02.
16. PDVSA - Manual de Ingeniería de Riesgos Volumen I. “Filosofía de Diseño Seguro”. IR-S-01.
17. Robin Pitblado,John Baik,Vijay Raghunathan.LNG decision making approaches compared. DNV consulting (usa)Inc .Houston ,Usa.
18. Torres, Paúl (2010). Diseño de facilidades Petroleras Tipo Pipe Rack Por Cargas de Impacto. Trabajo de Grado Ingeniería Civil, Escuela Politécnica del Ejército,Sangolquí.Disponible:<http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/1725/1/T-ESPE-029259.pdf>.*[Consulta: 2012, Abril 25]*
19. Van den Bosch, C. (1996). *Methods for the calculation of physical effects*, 3era ed. La Haya: TNO. 870p.
20. Torres, Paúl (2010). Diseño de facilidades Petroleras Tipo Pipe Rack Por Cargas de Impacto. Trabajo de Grado Ingeniería Civil, Escuela Politécnica del Ejército,Sangolquí.Disponible:<http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/1725/1/T-ESPE-029259.pdf>.*[Consulta: 2012, Abril 25]*
21. Users Manual.Quest Consultants Inc.Oklahoma ,Usa.

ANEXO A

A.1 La Onda de Presión

El efecto más característico de una explosión es el brusco aumento de la presión que se produce en el aire circundante y que se propaga en forma de onda en todas las direcciones libres del espacio. La forma, características y magnitud de la onda dependen del tipo de explosión, del entorno y de la distancia al origen del accidente (Díaz, 2012).

La máxima presión alcanzada por la onda en un punto dado se conoce como “pico de presión estática” o “sobrepresión estática”, P_s . El período de tiempo en el que la presión es superior a la presión atmosférica (P_o), se conoce como “duración de la fase positiva”, t_p . A dicho periodo suele seguirle una “depresión” o fase negativa, que no se tiene en cuenta a efectos de cálculo de consecuencias dado que su valor absoluto máximo es mucho menor que el de la fase positiva (Díaz, 2012).

A continuación se muestra la figura N° A.1, donde se muestra la evolución de la sobrepresión con el tiempo, para explosiones detonantes (A) y deflagrantes (B).

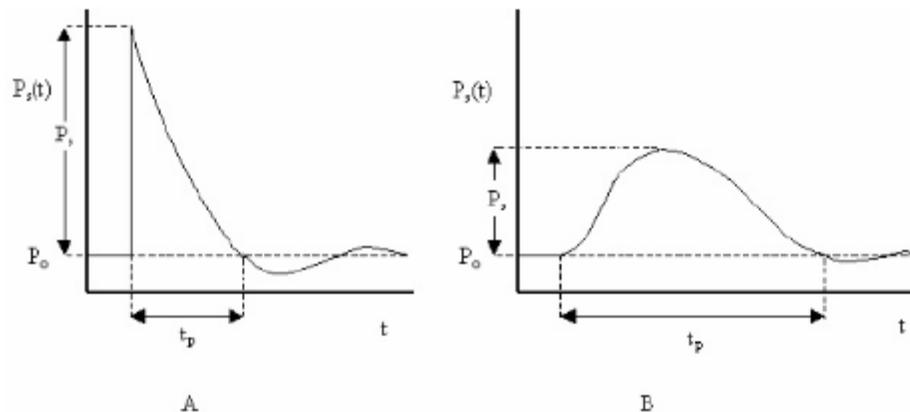


Figura A.1. Evolución de la sobrepresión con el tiempo para explosiones detonantes y deflagrantes (Díaz, 2012).

Se distinguen dos perfiles de la onda de presión: el detonante y el deflagrante (figura N°A.1 A y B). El primero es más agudo, de manera que el valor máximo se

alcanza súbitamente. En una explosión deflagrante, la velocidad de aumento de la presión es mucho más lenta. Otra diferencia significativa de ambos tipos de ondas es que la duración de la fase negativa de las detonantes es mayor que las de las deflagrantes. La onda detonante conforme avanza y se aleja del origen de la explosión, se va suavizando y su perfil acaba siendo similar al de la onda deflagrante. La diferenciación de la onda detonante y deflagrante está también relacionada con la audibilidad de las mismas, de modo que solo la primera es audible (Díaz, 2011).

Además del pico de sobrepresión y la duración de la fase positiva, la onda está también caracterizada por el “impulso mecánico” ejercido sobre cualquier objeto, en adelante “impulso” (i), que se define según la expresión:

$$i = \int_0^{t_p} P_s(t) dt \quad \text{Ec.34}$$

A.2 Clasificación de las Explosiones.

A continuación se presenta la figura N° A.2, donde se muestra la clasificación de las explosiones según su origen.

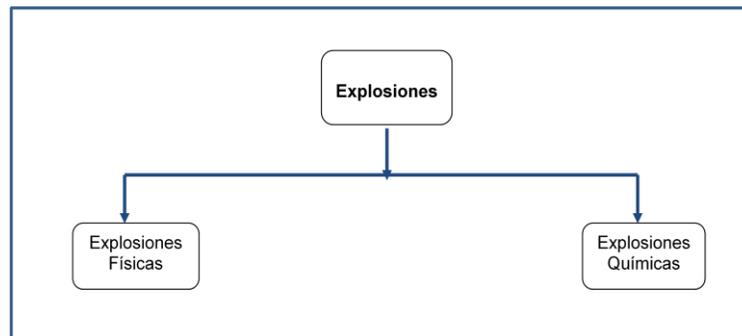


Figura N° A.2 Clasificación de las explosiones según su origen.(Kiwa, Sf)

Explosiones Físicas.

Cuando un recipiente que contiene gas a presión se rompe, la energía almacenada se libera. Esta energía puede producir una onda de choque y acelerar fragmentos del recipiente (CPPS, 2003).

Una explosión física se refiere a la rotura catastrófica de un recipiente lleno de gas presurizado. Esta explosión no supone cambios en la naturaleza química básica de la sustancia que hay almacenada en el recipiente. La rotura puede producirse debido a las siguientes causas:

- Falta de regulación de presión y equipo de alivio de presión (sobrepresión física).
- Reducción en el grosor del recipiente debido a :
 - a. Corrosión.
 - b. Erosión.
 - c. Ataque químico.
- Reducción en la fortaleza del recipiente debido a:
 - a. Sobrecalentamiento.
 - b. Defectos del material con el desarrollo posterior de la fractura.
 - c. Ataque químico, por ejemplo, corrosión bajo tensión.
- Reacción interna fuera de control
- Cualquier otro incidente que resulte en la pérdida de contención del proceso.

Cuando el contenido del recipiente se libera, una onda de choque y proyectiles puede resultar. Los efectos son más similares a una detonación de una explosión por nube de vapor. La extensión de la onda de choque depende de la fase del contenido del recipiente originalmente presente (CPPS, 2003).

Una explosión puramente mecánica es por ejemplo la rotura de una garrafa de GLP o de un depósito a alta presión (cilindros), que producen la liberación del gas almacenado, por ejemplo aire comprimido, dióxido de carbono, nitrógeno u oxígeno.

Entre este tipo de explosión encontramos las explosiones por liberación de gas comprimido, explosiones por cambios de fase (BLEVE).

Explosiones Químicas.

Son aquellas explosiones donde la generación del gas a alta presión resulta de la reacción química de un producto donde la naturaleza del mismo difiere de la inicial (reactivo). La reacción química más común presente en las explosiones es la combustión, donde un combustible (por ejemplo el metano) se mezcla con aire, se inflama y arde generando dióxido de carbono, vapor de agua y otros subproductos. Hay otras reacciones químicas que generan gases a alta presión, como las reacciones de descomposición. Cualquier reacción química puede provocar una explosión si se emiten productos gaseosos. Las reacciones químicas pueden clasificarse en uniformes y de propagación (Kiwa, SF).

Reacciones Uniformes.

Son aquellas donde los reactivos reaccionan en toda su masa al mismo tiempo, pero no en forma instantánea. Por lo general este tipo de reacción lleva un tiempo de producción determinado, durante el cual, toda la masa de los reactivos está reaccionando (Kiwa, SF).

La reacción se produce de forma simultánea o casi simultánea en todos los puntos de la masa reactiva, por descomposición o combinación de reactivos. Este tipo de reacciones, generan gases a alta presión mediante diversos mecanismos (Kiwa, SF):

- Productos gaseosos de la reacción.
- Vaporización de líquidos presentes en el sistema.
- Calentamiento de gases existentes en el sistema.

Dentro de este tipo de reacciones se encuentran las explosiones térmicas (Kiwa, SF).

Reacciones de propagación.

Son reacciones que comienzan en un lugar específico de la masa reactiva y se propagan a través de ella según el frente de reacción. En una reacción explosiva, si la velocidad del frente de reacción es menor que la velocidad del sonido se producirá una deflagración, pero si es mayor se producirá una detonación. En una reacción de propagación pueden diferenciarse tres zonas distintas (Álvarez, 2006):

- Zona de reacción (llama).
- Zona de productos (detrás de la llama).
- Zona sin reacción (frente de llama).

A continuación la figura N° A.3 donde se muestra el mecanismo de una reacción por propagación:



Figura N° A.3 Mecanismo de una reacción de propagación (Álvarez, 2006).

La detonación es la forma más violenta de la combustión, en que el frente de la llama está vinculado a una onda de choque y se mueve a una velocidad mayor que la velocidad del sonido. Ejemplos bien conocidos de mezclas de gas y aire que pueden detonar son el hidrógeno, acetileno, etileno y óxido de etileno. Una deflagración es un proceso de velocidad de combustión más baja, con velocidades inferiores a la velocidad del sonido en el medio que no ha reaccionado, pero puede someterse a una transición a la detonación. Esta transición se produce en las tuberías, pero es poco probable que en los recipientes de proceso o al aire libre (CPPS, 2003).

Deflagración

Es una explosión que tiene una velocidad de reacción subsónica, inferior a la velocidad del sonido. Las reacciones que provoca una deflagración son idénticas a las de una combustión, pero se desarrollan a una velocidad comprendida entre 1m/s y la velocidad del sonido. En este caso, el frente de reacción se desarrolla por delante de la onda de presión, es decir, que la presión es una consecuencia de la reacción. Un ejemplo de deflagración son los Flash Fire (Crowl, D y Louvar J., 2002).

A continuación se muestra la figura N°A.4 donde se muestra el mecanismo de reacción de una deflagración:

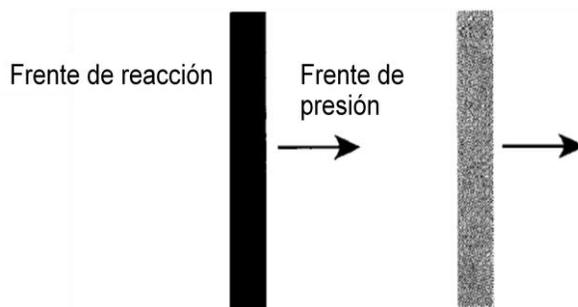


Figura N° A4. Mecanismo de una Deflagración (Crowl, D y Louvar J., 2002).

Como se muestra en la figura N°4, en una deflagración el frente de reacción se mueve a una velocidad menor que la del sonido, mientras que el frente de presión se aleja del frente de reacción a la velocidad del sonido (Crowl, D y Louvar J.,2002).

Detonación

En algunas reacciones de combustión el frente de reacción se propaga por una onda de presión fuerte, el cual comprime la mezcla sin reaccionar en frente del frente de reacción por encima de su temperatura de autoignición. Esta compresión se produce rápidamente, dando lugar a un cambio brusco de presión o de choque de frente a la parte delantera de reacción. Esto se conoce como una detonación (Crowl, D y Louvar J., 2002).

En una detonación, el frente de reacción se mueve a una velocidad más grande que la velocidad del sonido, impulsando el frente de choque que le precede

inmediatamente, ambos frentes se mueven a la misma velocidad, tal como se muestra en la figura N°A.5 (Crowl, D y Louvar J.,2002).

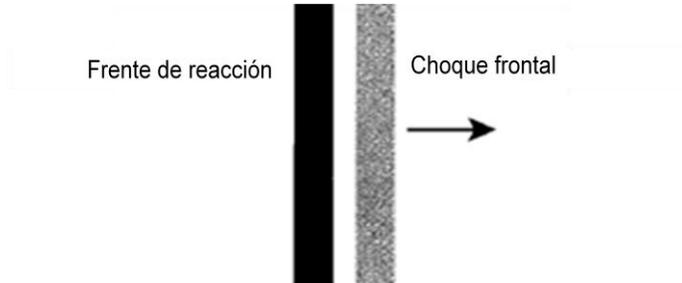


Figura N° A.5 Mecanismo de una explosión por detonación (Crowl, D y Louvar J., 2002).

Las detonaciones son siempre para una determinada cantidad de energía mucho más destructivas que las deflagraciones, ya que pueden llegar a tener picos de presión cercanos a los 20 bar, mientras que en las deflagraciones los valores máximos son de unos 8 bar. De todas formas, también hay que tener en cuenta que es muy difícil iniciar una detonación; por el contrario, las deflagraciones requieren de muy poca energía (del orden de 1 mJ) para iniciarse. En determinadas situaciones, sin embargo, una deflagración puede llegar a convertirse en una detonación (por ejemplo, en el caso de un frente de llama que se propaga dentro de una tubería). En esta categoría podemos encontrar a las explosiones por nube de vapor

Principales diferencias entre Deflagración y Detonación.

A continuación se muestra la tabla N° A.1, donde se muestra las principales diferencias entre detonación y deflagración.

Tabla N° A.1, Diferencias entre Deflagración y Detonación (Álvarez, 2006).

	Deflagración	Detonación
Presión Desarrollada	Baja (1 a 10 bar)	Alta (más de 10 ⁵ bar)
Velocidad de Propagación	Baja (0,001 a 100 m/s)	Alta (más de 1000 m/s)
Frente de llama respecto de onda de presión.	Atrasado	Acoplado

ANEXO B

Algoritmo de Cálculo empleado en PHAST.

Etapa 1. Cálculo de la masa de TNT Equivalente (M_{TNT} , Kg).

$$m_{TNT} = \frac{H_{Combustión} * m * x * f_e}{H_{TNT}} \quad \text{Ec. 35}$$

Donde:

$H_{Combustión}$ = Calor de combustión del combustible (J/Kg).

m = masa de la sustancia inflamable (Kg).

x = índice de eficiencia (adimensional).

f_e = Factor de reflexión de tierra (adimensional).

H_{TNT} = Calor de combustión del TNT (J/Kg).

Etapa 2 Determinación de la distancia escalada.

La distancia escalada se define como:

$$z = \frac{R}{(m_{TNT})^{\frac{1}{3}}} \quad \text{Ec. 36}$$

Donde:

Z = Distancia escalada ($m/Kg^{1/3}$)

m_{TNT} = masa de TNT equivalente (Kg).

R = Radio de la explosión, medida desde el centro de la misma (m).

Etapa 3 Sobrepresión en distancias de interés.

En la pestaña de liberación, se establece una distancia mínima y máxima de interés, y un tamaño de paso para ser utilizado entre estas distancias. En cada paso en esta línea, el programa realiza los siguientes cálculos (DNV, 2006):

Radio de la explosión.

El radio de explosión, R , es la distancia desde el centro de la explosión a la distancia de interés.

$$R = d_i^{input} - d_{explosión} \quad \text{Ec. 37}$$

Donde:

R= Radio de la explosión (m).

d_i^{input} = Distancia de interés (m).

$d_{explosión}$ = Distancia donde toma lugar la explosión medida desde la fuga (m).

Si $mX'H$ combustion es inferior a 103 J entonces la sobrepresión se establece en cero. De lo contrario, el exceso de presión P_o se calcula utilizando una aproximación de las curvas Kingery y Bulmash que se publica en Lees (1996):

$$\log P_o = a(\log z)^2 + b \log(z) + c \quad \text{Ec.38}$$

Donde:

P_o = exceso de presión (Pa).

Z= Distancia escalda ($\text{Kg/m}^{1/3}$).

a= 0,2518

b= -2,20225

c= 5,8095

Etapa 4 Distancias a sobrepresión de interés.

Habrà un máximo de tres sobrepresiones de interés especificada en los parámetros. Para cada sobrepresión de interés el programa realiza los siguientes cálculos:

Calcula la distancia escalada mediante la ecuación 22, luego el radio de la explosión mediante ecuación 20, y finalmente la distancia de interés a través de la ecuación 21.

Aplicabilidad del TNT EQUIVALENTE.

Por la propia naturaleza del método, que compara la energía liberada en una explosión con los efectos equivalentes del TNT, es especialmente aplicable a sustancias explosivas o muy inestables.

Mayor incertidumbre tiene su aplicación a las nubes de vapor y a la rotura de recipientes a presión. En el primer caso, la estimación de la eficiencia de la explosión presenta grandes dificultades, y supone por ello la mayor fuente de incertidumbre del procedimiento. Asimismo, cabe destacar que el TNT da lugar a explosiones detonates, cuyo perfil difiere considerablemente de las deflagrantes, que son las que suelen originar las nubes de vapor. Estas diferencias, más pronunciadas en las zonas cercanas al origen de la explosión, provocan notables desviaciones de la sobrepresión y del impulso. En cuanto al estallido de recipientes, la incertidumbre del factor de eficiencia desaconseja la utilización de este método.

ANEXO C

CÁLCULOS TIPO

1-Cálculo del volumen de la nube.

Para el cálculo del volumen de la nube, se cálculo el área de la nube proyectada sobre el plano XY y se múltiplo por la altura promedio de la misma, los cuales fueron tomados de los gráficos del footprint y Sideview arrojados por Phast.

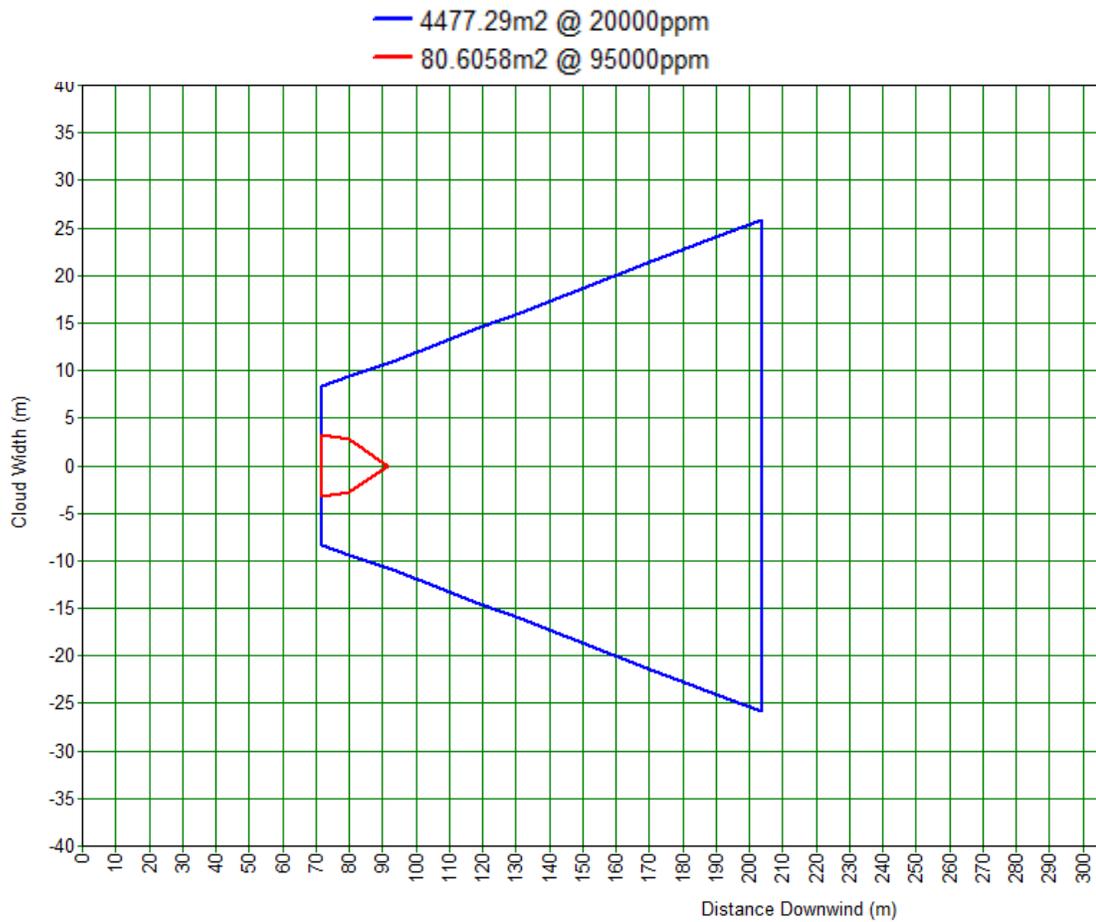


Figura N° C.1 vista desde arriba de la nube arrojada por Phast.

De la figura C.1 se obtiene que el área de la nube es de aproximadamente 4396,68 m².

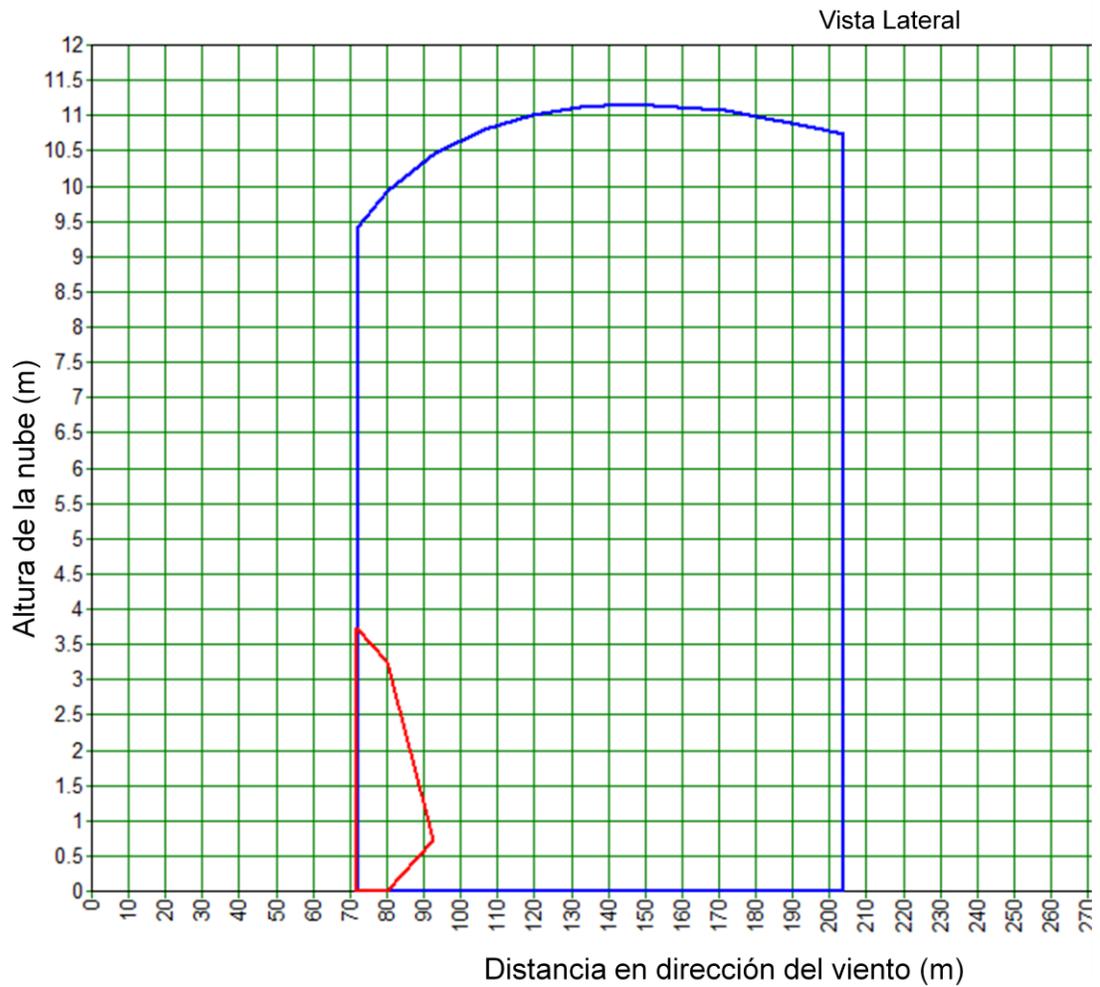


Figura C.2 vista lateral de la nube arrojada por Phast 6.54

De la figura C2 se obtiene que la altura promedio de la nube es de aproximadamente 10,5 m.

Luego el volumen de la nube viene dado por:

$$V = \text{área de la sección transversal} * \text{altura} = 4396,68 \text{ m}^2 * 10,5 = 46165,14 \text{ m}^3.$$

ANEXO D

1- Gráficos correspondientes a intensidad de explosión de 3 y 10 respectivamente para el método TNO Multienergía.

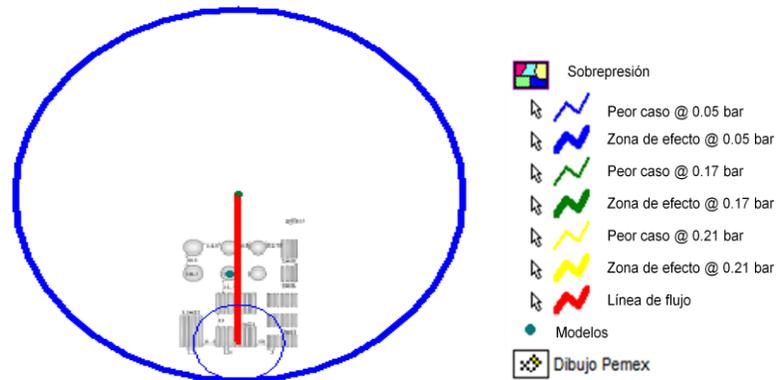


Figura N° D.1 Distancias de afectación para los niveles de sobrepresión fijados para el método TNO Multienergía con una intensidad de explosión de 3.

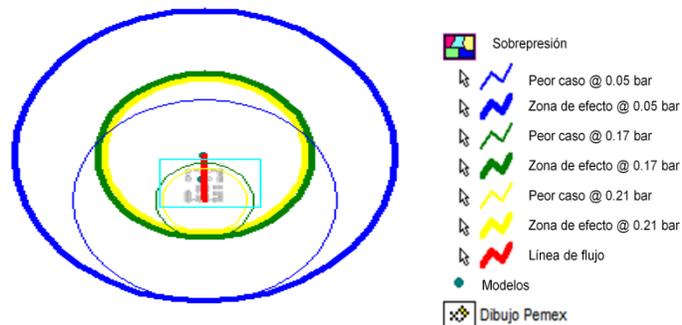


Figura N° D.2 Distancias de afectación para los niveles de sobrepresión fijados para el método TNO Multienergía con una intensidad de explosión de 10.

2-Gráficos correspondientes a puntos de ignición ubicados a 130 m y 100 m desde la fuga para el método TNO Multienergía.

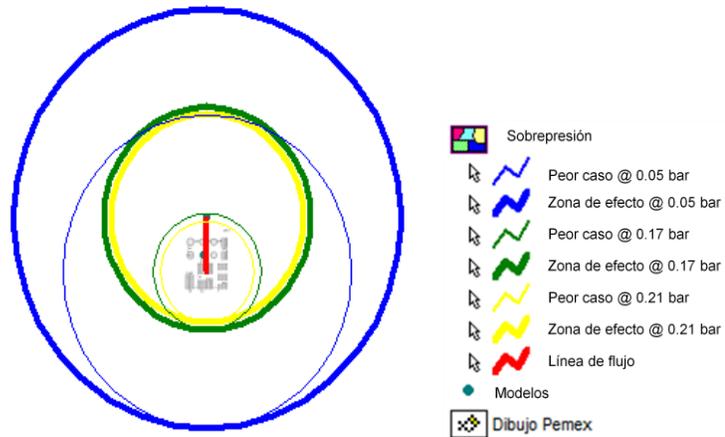


Figura N° D.3 Distancias de afectación para los niveles de sobrepresión fijados para el método TNO Multienergía con ubicación del punto de ignición a 130 m desde la liberación.

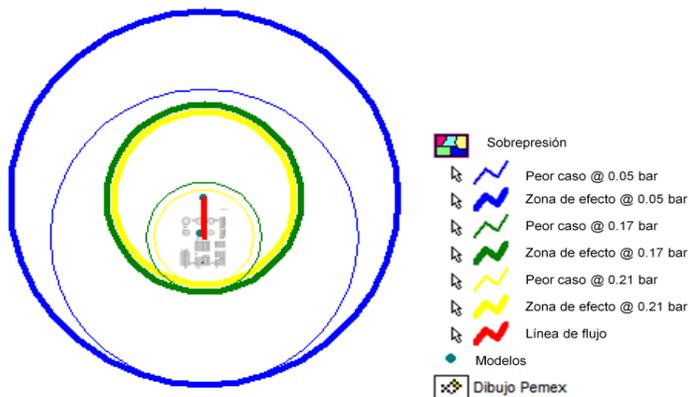


Figura N° D.4 Distancias de afectación para los niveles de sobrepresión fijados para el método TNO Multienergía con ubicación del punto de ignición a 100 m desde la liberación.