

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA NACIONAL DE MEDICINA Y HOMEOPATÍA
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN SALUD
OCUPACIONAL, SEGURIDAD E HIGIENE**

**“EVALUACIÓN DE RIESGOS POR INCENDIO Y/O EXPLOSIÓN EN
UNA PLANTA DE HIDROTRATAMIENTO DE GASOLINA”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS EN
SALUD OCUPACIONAL, SEGURIDAD E HIGIENE

PRESENTA

LUIS ALBERTO DEL BARCO MARTINEZ



DIRECTORA DE TESIS

M. en C. Guadalupe González. Díaz

Ciudad de México, Junio de 2016



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, el día 22 del mes de junio del año 2016, el que suscribe **Del Barco Martínez Luis Alberto**, alumno del Programa de Maestría en Ciencias en Salud Ocupacional, Seguridad e Higiene, con número de registro **B140812**, adscrito a la **Escuela Nacional de Medicina y Homeopatía**, manifiesta que es el autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de la **M. en C. Guadalupe González Díaz**, y cede los derechos del trabajo titulado **“Evaluación de riesgos por incendio y/o explosión en una planta de hidrotreamiento de gasolina”**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o directora del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección delbarmtz@msn.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Luis Alberto Del Barco Martínez



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México siendo las 20:40 horas del día 02 del mes de JUNIO del 2016 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de La ENMYH para examinar la tesis titulada:

Evaluación de riesgos por incendio y/o

explosión en una planta de hidrotreamiento de gasolina

Presentada por el alumno:

Del Barco

Apellido paterno

Martínez

Apellido materno

Luis Alberto

Nombre (s)

Con registro:

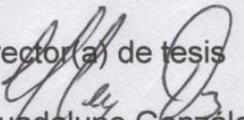
B	1	4	0	8	1	2
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de: Maestría en Ciencias en Salud Ocupacional, Seguridad e Higiene

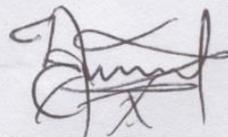
Después de intercambiar opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA DEFENSA DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

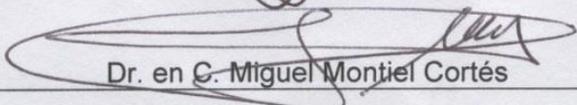
LA COMISIÓN REVISORA

Director(a) de tesis


M. en C. Guadalupe González Díaz


Dr. en C. César Augusto Sandino Reyes López

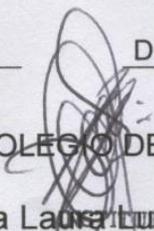

Dr. en C. Absalom Zamorano Carrillo


Dr. en C. Miguel Montiel Cortés


Dra. en C. María del Carmen López García

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

EDUCACION PUBLICA


Dra. en C. Ana Laura Torres

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA NACIONAL DE MEDICINA

Y HOMEOPATIA

SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

E INVESTIGACION



AGRADECIMIENTOS

Agradezco sinceramente a mi directora de tesis, la Dra. Guadalupe González Díaz, por su esfuerzo, orientación, su paciencia y su motivación que fueron fundamentales para la conclusión de este proyecto de Tesis.

Agradezco a la Ing. Ruth Moravia Martínez Ruvalcaba, por brindarme el apoyo y facilidades para poder realizar y concluir mis estudios de posgrado, así como también el invaluable apoyo de mis compañeros y amigos José Alberto Sotelo Arcos, Alejandro Morales Silva, Guadalupe Jiménez Pereira, gracias por su apoyo técnico, por los datos e ideas, así como el ánimo recibido todo este tiempo.

A mis padres doy gracias, por su gran amor, por su paciencia, por ayudarme a lograr este objetivo, por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad; muchos de los logros se los debo a ustedes, en los que incluyo este. Me formaron con reglas y ciertas libertades, pero al final de cuentas, me motivaron con constancia para alcanzar mis anhelos agradezco a mi hermanita Lilian, a mi cuñado Hugo, a mis sobrinos Sarita, Dany y Solecito, por su amor y estímulo que de ellos siempre recibo.

Doy gracias a mis abuelitos, a mis tíos, por su gran cariño, por sus consejos, por su ánimo que me han impulsado a ser mejor cada día.



ÍNDICE

CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS.....	I
ACTA DE REVISIÓN DE TESIS.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
ÍNDICE.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
GLOSARIO.....	X
ACRÓNIMOS.....	XIII
RESUMEN.....	XV
ABSTRACT.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	1
Planteamiento del problema.....	3
Justificación.....	3
Objetivo general.....	6
Objetivos particulares:.....	6
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES.....	10
1.1 Estudios previos.....	10
1.2 Descripción de la instalación Industrial.....	14
CAPÍTULO 2. MARCO TEORICO.....	18
2.1 Anatomía de un incidente de proceso.....	18
2.2 Análisis de riesgos.....	24
2.3 Metodologías de análisis de riesgos.....	25
2.3.1 Métodos cualitativos para el análisis de riesgos.....	25
2.3.2 Métodos semicuantitativos.....	31
2.3.3 Métodos cuantitativos.....	34
2.3.3.1 Árboles de Fallas (FTA).....	34
2.3.4 Accidentes Mayores.....	35
2.3.5 Liberación de materiales peligrosos.....	36
2.4 Escenarios accidentales.....	42



2.4.1 Incendios	44
2.4.2 Efectos de calor radiante.....	50
2.4.3 Explosiones.....	61
2.4.4 Efecto de explosiones.....	69
2.5 Efectos a la salud por exposición a humos de incendios.....	78
2.5.1 Los productos de la combustión y sus efectos sobre la seguridad humana	78
2.5.2 El fuego y los materiales combustibles	79
2.5.3 Propiedades de inflamabilidad de los materiales	80
2.5.4 Gases del incendio.....	81
2.5.5 Física de la combustión	84
2.5.6 Toxicidad de los gases de incendio.....	85
2.5.7 Riesgos Tóxicos de los incendios	95
2.5.8 Variabilidad de la respuesta humana a los gases de incendio	99
2.6 Marco legal.....	100
2.6.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos	101
2.6.2 Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente	101
2.6.3 Primer listado de actividades altamente riesgosas (manejo de sustancias tóxicas).....	102
2.6.4 Segundo listado de Actividades altamente riesgosas (manejo de sustancias inflamables y explosivas)	102
2.6.5 Reglamento de LGEEPA, 2014	102
2.6.6 Ley Federal del Trabajo	102
2.6.7 Reglamento Federal de Seguridad y Salud en el Trabajo	103
2.6.8 Normas Oficiales Mexicanas	104
2.6.9 Convenios Internacionales Relacionados con la seguridad y salud en el trabajo	107
2.6.10 Normativa Internacional en análisis de riesgos.	107
CAPÍTULO 3. PROCEDIMIENTO O MÉTODO.....	110
3.1 Método	110
3.2 Análisis de Riesgo Cuantitativo (QRA).....	111
3.2.1 Etapas del Análisis de Riesgos Cuantitativo (QRA).....	111
3.2.2 Identificación de escenarios de riesgo de incendio y/o explosión.....	112
3.2.3 Estimación de consecuencias	112
3.2.4 Estimación de frecuencias.....	113
3.2.5 Estimación del riesgo.....	114
3.2.6 Evaluación del riesgo estimado	114
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	117
4.1 Escenarios de riesgo	117
4.2 Resultado del estimado de consecuencias.....	118
4.2.1 Resultados de cálculo de explosiones	119
4.2.2 Resultados del cálculo de radiación por incendio	121



4.2.3 Graficas de sobre presión y radiación	123
4.3 Estimación de frecuencias	143
4.4 Cuantificación del riesgo	147
4.4.1 Evaluación del riesgo	149
4.5 Discusión	149
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	153
CAPÍTULO 6. RECOMENDACIONES.....	155
REFERENCIAS	158
ANEXO 1	168
ANEXO 2.....	170
ANEXO 3.....	172
ANEXO 4.....	174
ANEXO 5.....	176



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Accidentes en la Industria Química.....	3
Tabla 2 Materiales peligrosos involucrados en accidentes (1996-2002).	4
Tabla 3 Accidentes en la industria petrolera nacional.....	5
Tabla 4 Elementos de incidentes de procesos	20
Tabla 5 Metodologías de análisis de riesgo.	25
Tabla 6 Valores de las temperaturas críticas.....	49
Tabla 7 Valores promedio de propiedades de la piel de un hombre de 70 kg y 1.7m	52
Tabla 8 Límites de intensidad de radiación térmica	54
Tabla 9 Tiempos de reacción y velocidades de escape	56
Tabla 10 Coeficientes c_1 y c_2	58
Tabla 11 Probabilidades para dosis específica.	59
Tabla 12 Parámetros que afectan Significativamente el comportamiento de las explosiones.	62
Tabla 13 Alcance de daños en función de la sobrepresión.	69
Tabla 14 Factores de concentración.	98
Tabla 15 Escenarios de riesgo seleccionados.	117
Tabla 16 Niveles de sobrepresión y radiación que afectan a las personas	118
Tabla 17 Resultados de sobrepresión	119
Tabla 18 Resultados de sobrepresión	120
Tabla 19 Resultados de Radiación térmica.....	121
Tabla 20 Resultados de Radiación térmica.....	122
Tabla 21 Frecuencia de eventos de pérdida de contención.....	143
Tabla 22 Resultados del análisis de frecuencias	145



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Secuencia de incidentes que desencadena un accidente.	18
Figura 2 Anatomía de un incidente catastrófico.	22
Figura 3 Secuencia básica de un incidente sin salvaguardas.....	23
Figura 4 Secuencia de eventos potenciales en la liberación de materiales peligrosos.	37
Figura 5 Tipos de quemaduras.	51
Figura 6 Comparación de la dinámica de una detonación y una deflagración.....	63
Figura 7 Etapa 1 Propagación de la flama a través de la nube	66
Figura 8 Frente de llama de trama arrugada.	67
Figura 9 Etapa 3 Frente de llama turbulenta debido a obstáculos.	67
Figura 10 Etapa 4 Creación de onda de choque.	68
Figura 11 Etapa 5 Curva característica de una detonación.	68
Figura 12 Curvas simplificadas sobrepresión – tiempo.....	70
Figura 13 Posición del cuerpo humano en relación con la onda de choque.	74
Figura 14 Metodología del análisis de riesgo cuantitativo.....	111
Figura 15 Tolerancia al riesgo	115
Figura 16 Gráfica sobrepresión escenario 1	123
Figura 17 Gráfica radiación escenario 1	124
Figura 18 Gráfica sobrepresión escenario 2	125
Figura 19 Gráfica radiación escenario 2	126
Figura 20 Gráfica sobrepresión escenario 3	127
Figura 21 Gráfica radiación escenario 3	128
Figura 22 Gráfica de sobrepresión escenario 4	129
Figura 23 Gráfica de radiación escenario 4	130
Figura 24 Gráfica de sobrepresión escenario 5	131



Figura 25 Gráfica de radiación escenario 5	132
Figura 26 Gráfica sobrepresión escenario 6	133
Figura 27 Gráfica radiación escenario 6	134
Figura 28 Gráfica sobrepresión escenario 7	135
Figura 29 Gráfica radiación escenario 7	136
Figura 30 Gráfica de sobrepresión escenario 8	137
Figura 31 Gráfica de radiación escenario 8	138
Figura 32 Gráfica de sobrepresión escenario 9	139
Figura 33 Gráfica de radiación escenario 9	140
Figura 34 Gráfica de sobrepresión escenario 10	141
Figura 35 Gráfica de radiación escenario 10	142
Figura 36 Árbol de eventos liberación de líquidos inflamables	144
Figura 37 Árbol de eventos liberación de vapores inflamables.....	144
Figura 38 Evaluación del riesgo.....	149
Figura 39 Capas de Protección	156



GLOSARIO

Accidente: ocurrencia de una secuencia de eventos que produce involuntariamente lesiones, muerte o daños a la propiedad (Crowl, 2003).

Aerosol: Gotas de líquido o partículas sólidas de tamaño suficientemente pequeño para permanecer suspendidas en el aire por prolongados periodos de tiempo (Crowl, 2003).

Barrera: medida que reduce la probabilidad de que un peligro produzca un daño potencial así como reduce su consecuencia (ISO 17776, 2000).

Consecuencia: Medida de los efectos esperados de un incidente resultante (CCPS, 2000).

Deflagración: Una reacción en la que la velocidad del frente de reacción se propaga a través de la masa sin reaccionar a una velocidad menor que la velocidad del sonido en el medio que no ha reaccionado (Crowl, 2003).

Detonación: Reacción en la cual la velocidad del frente de reacción se propaga a través de un medio sin reaccionar a una velocidad superior a la velocidad del sonido el medio sin reaccionar (Crowl, 2003).

Escalación: propagación de los efectos de un evento peligroso en el equipo u otras áreas, lo que provoca un aumento de las consecuencias del suceso (ISO 17776, 2000).

Evaluación de riesgo: juicio, sobre la base del análisis de riesgos, de si un riesgo es tolerable. (ISO 17776, 2000).

Evento iniciador: Secuencia de eventos no planificados específicos, compuestas de sucesos iniciadores y eventos intermedios que pueden conducir a un incidente (CCPS, 2000).

Explosión: liberación repentina de energía, que genera una onda de presión que se desplaza alejándose de la fuente mientras va disipando energía. Esta liberación tiene que ser, no obstante, bastante rápida y concentrada para que la onda que se genera sea audible (Casal, 2001).

Explosiones de nube vapor confinado (VCE): ocurren cuando habiéndose producido un escape de un gas o de un vapor inflamable en un área confinada, el gas está dentro de los límites de inflamabilidad y encuentra un punto de ignición (Casal, 2001).

Flamazo (flash fire): Combustión de una gran nube de gas inflamable. No se producen sobrepresiones importantes, pero pueden ocurrir daños por radiación térmica y la incidencia de la llama directa (Crowl, 2003).

Frecuencia: Número de ocurrencia de un evento por unidad de tiempo (CCPS, 2000).



Incendio tipo charco, (*pool fire*): Se originan cuando se produce un escape o vertido de un líquido combustible sobre el suelo y en el exterior. El líquido se irá esparciendo hasta que encuentre una barrera o hasta que se haya consumido todo el combustible en el incendio (Casal, 2001).

Incendio tipo chorro (*jet fire*): se produce el vertido accidental de vapores o gases inflamables a presión, en áreas de proceso o depósitos de almacenaje (Casal, 2001).

Incidente: Pérdida de contención de material o energía (CCPS, 2000).

Incidente /accidente: evento o cadena de eventos que cause o podría haber causado lesiones, enfermedades y / o daños (pérdidas) de activos, el medio ambiente o de terceros (ISO 17776, 2000).

Incidente resultante: Manifestación física del incidente, por ejemplo: para materiales tóxicos, el incidente resultante es una liberación tóxica, mientras que para materiales inflamables, el incidente resultante puede ser explosión, incendio (CCPS, 2000).

Límites de inflamabilidad: intervalo que se conocen con el nombre de límite inferior de inflamabilidad (*LFL*) y límite superior de inflamabilidad (*UFL*), y se expresan como la concentración de combustible en una determinada mezcla oxidante/diluyente y a una determinada presión y temperatura (Casal, 2001).

Mitigación: Limitación de los efectos indeseables de un particular evento (ISO 17776, 2000).

Modelo fuente: modelo empleado para definir cuantitativamente el escenario de liberación por la estimación de tasa de descarga, cantidad total liberada (o la duración total de liberación), extensión de un charco considerando el flash y la evaporación (CCPS, 2000).

Onda de choque (*Blast wave*): Una onda de presión se propaga en el aire como resultado de una explosión (Crowl, 2003).

Peligro: Una condición química o física que tiene el potencial de causar daño a la gente, propiedad o al ambiente (CCPS, 2000).

Presión dinámica: Presión causada por el viento asociado con una onda de choque (Crowl, 2003).

Riesgo: Combinación de la probabilidad de que se produzca un daño y de la consecuencia del evento (ISO 17776, 2000).

Riesgo Individual: Riesgo al que se ve expuesto un individuo en la vecindad de un peligro (Casal, 2007).



Riesgo tolerable: riesgo que se acepta en un contexto determinado sobre la base de los valores actuales de la sociedad (ISO 17776, 2000).

Sobre presión: Presión por encima de la ambiente que resulta de una explosión (Crowl, 2003).

Temperatura de auto-ignición: aquella a la que una sustancia inflamable puede arder en aire sin necesidad de una fuente de ignición externa (Casal, 2001).

Temperatura de inflamación: temperatura mínima a la que se produce suficiente vapor como para formar, cerca de la superficie del líquido, una mezcla con aire que se encuentre dentro de los límites de inflamabilidad (Casal, 2001).



ACRÓNIMOS

ALARP	Tan bajo como sea razonablemente práctico (As Low As Reasonably Practicable).
BPCS	Sistema básico de control de procesos.
CCPS	Centro para la seguridad de procesos químicos (Center for Chemical Process Safety).
CFD	Dinámica de fluidos computacional.
DOE	Department of energy.
FM	Factor de material.
GN	Gas Natural.
GPHs	Peligro general del proceso.
HAZOP	Análisis de peligros y operabilidad
IFyE	Índice de fuego y explosión.
INSHT	Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
LFL	Límite inferior de inflamabilidad.
LPG	Gas licuado de petróleo.
MPDP	Máximo Probable daño a la Propiedad.
NFPA	National Fire Protection Association.
NOM	Norma Oficial Mexicana.
NTP	Notas Técnicas de Prevención.
OIT	Organización Internacional del Trabajo.
PUHF	Factor de peligro de la unidad de proceso.
QRA	Análisis cuantitativo de riesgos
UFL	Límite superior de inflamabilidad.





RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue: Identificar y evaluar el riesgo de incendio y/o explosión, en una planta hidrotratadora de gasolina, ubicada en el estado de Veracruz. Material y método: investigación de campo, observacional, transversal descriptiva y participativa. Se estudió una Planta de hidrotratamiento de gasolina, diseñada para procesar 25,000 barriles por día de gasolina catalítica amarga. El tiempo de estudio fue de un año, empleando el material y equipo: Laptop, Plano de Distribución de Equipos, Balances de materia y energía, Diagramas de tubería e instrumentos (DTI's), Software de evaluación de consecuencias Phast v.6.54. El procedimiento para el desarrollo del proyecto, consistió en la aplicación de la metodología de análisis de riesgo cuantitativo (QRA), la cual nos permite evaluar el riesgo de la instalación en términos de Riesgo individual. Mediante la identificación de escenarios de riesgo de incendio y/o explosión; Cálculo de la magnitud de las consecuencias de los eventos de pérdida de contención de materiales peligrosos; Estimación de frecuencia de eventos de pérdida de contención y probabilidades de las manifestaciones físicas accidentales tales como incendio tipo chorro, explosiones de nube de vapor, Flamazos; Determinación del riesgo, a través de la combinación de las consecuencias y frecuencia de los eventos accidentales; Evaluación del riesgo, para determinar si es tolerable o no. Resultados: se establecieron diez posibles escenarios de pérdida de contención de materiales peligrosos, se calcularon las magnitudes de sobrepresión debido a explosiones y magnitudes de radiación así como sus respectivos radios de afectación, por medio de árboles de eventos se obtuvo por cada escenario la frecuencia con la que se presentaría cada uno de las manifestaciones accidentales, finalmente se determinó el riesgo de incendio y/o explosión para esta planta en un valor de 1.26×10^{-5} . Conclusiones: Se determinó el riesgo de incendio y/o explosión de la planta de hidrotratamiento de gasolina, obteniéndose un riesgo tolerable, de acuerdo a los criterios establecidos por la Health and Safety Executive (HSE) del Reino Unido.

Palabras clave:

Incendio; Explosión; Riesgo; Frecuencias; Fuga; Análisis cuantitativo de riesgo; materiales peligrosos.





ABSTRACT

The objective of this thesis was to Identify and assess the risk of fire and / or explosion in a gasoline hydrotreater plant, located in the state of Veracruz. Material and Method: field research, observational, descriptive transversal and participatory. Plant gasoline hydrotreater, designed to process 25,000 barrels per day of sour catalytic gasoline was studied. The time was one year study using materials and equipment: Laptop, Plan Distribution Equipment, material and energy balances, piping diagrams and instruments (PDI's), evaluation software v.6.54 Phast consequences. The procedure for the development of the project consisted of the application of the methodology of quantitative risk analysis (QRA), which allows us to assess the risk of the facility in terms of individual risk. By identifying risk scenarios of fire and / or explosion; Calculation of the magnitude of the consequences of the events of loss of containment of hazardous materials; Estimated frequency of events and likely loss of containment of accidental physical manifestations such as jet fire, vapor cloud explosions, Flash fire; Risk assessment, through the combination of the consequences and frequency of accidental events; Risk assessment to determine whether it is tolerable or not. Results: ten possible scenarios of loss of containment of hazardous materials were established, the magnitudes of pressure were calculated due to explosions and magnitudes of radiation as well as their respective radius of affectation, through event trees obtained by each scenario the frequency to be presented each accidental events, finally the risk of fire and / or explosion for this plant was determined at a value of 1.26 E-5. Conclusions: The risk of fire and / or explosion of gasoline hydrotreating plant was determined to give a tolerable risk, according to the criteria established by the Health and Safety Executive (HSE) in the UK.

Keywords:

Fire; Explosion; Risk; Frequency; Leakage; Quantitative risk analysis; Hazardous materials.





INTRODUCCIÓN

La industria desempeña un papel básico en el desarrollo de la sociedad, la mayor parte de los productos o materiales que utilizamos en nuestra vida cotidiana procede de la industria química.

Es reconocido que este desarrollo conlleva la interacción entre el hombre y los medios de producción, que ocasiona en varios de los casos, la exposición de los trabajadores a situaciones de riesgo en su ambiente laboral, lo que provoca desafortunadamente accidentes que pueden afectar la salud de los mismos, cuyas consecuencias pueden resultar en incapacidades temporales o incluso la pérdida de la vida.

De los diferentes accidentes industriales que se han presentado a lo largo de la historia de la industria química y de los cuales se tienen registros bibliográficos por los graves daños que estos ocasionaron, destacan sucesos como los de Flixborough (1974), San Juan de Ixhuatepec (1984), Bhopal (1984), Toulouse (2001), Enschede (2000), entre otros; los cuales se caracterizaron por la gran cantidad de víctimas, pérdidas materiales y daños severos al medio ambiente. Estos accidentes industriales resultaron particularmente en incendio, explosión, fuga y dispersión de materiales tóxicos.

La literatura especializada concluye que los accidentes industriales de incendio y/o explosión, inician con una serie de eventos denominados incidentes, los cuales usualmente resultan de la pérdida de contención del material involucrado en los procesos. Estos incidentes pueden ser: la ruptura de una tubería, un orificio en un tanque o tubería, reacciones fuera de control, fuegos externos incidentes sobre recipientes, entre otros.

La pérdida de contención de materiales peligrosos, <definido de esta manera por poseer características inflamables y tóxicas> tienen la probabilidad de generar incendios, los cuales de acuerdo al tiempo de exposición y magnitud de la radiación, pueden ocasionar al trabajador



quemaduras de Primer grado hasta quemaduras de Tercer grado y con ello el aumento de probabilidad de muerte dependiendo de la cantidad de área de piel afectada e inclusive la muerte instantánea si se expone a límites de radiación térmica que ocasione el 100% de letalidad.

En el caso de presentarse el fenómeno de explosión por la liberación de energía de dichos materiales peligrosos, generaría un incremento súbito de presión, que de acuerdo a su magnitud puede presentar efectos directos e indirectos a la salud de los trabajadores ocasionando lesiones o inclusive la fatalidad.

Los escenarios descritos anteriormente, en los últimos diez años han propiciado el desarrollo de diversas metodologías de análisis de riesgo de incendio y explosión; denominadas en la literatura especializada, metodologías cualitativas y cuantitativas.

El objetivo de las metodologías cualitativas es identificar los escenarios de riesgo sin evaluar el impacto de los mismos. Mientras que las metodologías cuantitativas, son técnicas de análisis crítico que incluyen estructuras y cálculos para establecer la probabilidad de sucesos complejos (accidentes).

Una de estas metodologías cuantitativas es el análisis de riesgo QRA, que consiste en un conjunto de métodos para estimar el riesgo por un sistema dado en términos de lesiones al personal y pérdidas económicas. Se caracteriza por la combinación de los modelos de estimación de la magnitud de los accidentes y la determinación de frecuencia de los mismos, para finalmente evaluar el riesgo de incendio y/o explosión del lugar de trabajo.

El propósito del presente trabajo de investigación es conocer cuál es el riesgo de incendio y/o explosión de manera cuantitativa en planta de procesamiento de gasolina. Para lo cual, se eligió estudiar una planta de estas características, localizada en el estado de Veracruz, que con base en el marco legal, está clasificada de forma cualitativa como de alto riesgo, iniciándose con la identificación de los escenarios de riesgo de incendio y/o explosión de la planta objeto de estudio, para proceder con la evaluación de las magnitudes de los escenarios de liberación de



materiales peligrosos, para posteriormente estimar las frecuencias de los eventos accidentales, cuantificar el riesgo y favorecer la toma de decisiones, que se traduzcan en mejoras de seguridad.

Planteamiento del problema

¿Cuál es el riesgo de incendio y/o explosión en la planta Hidrotratadora de gasolina, ubicada en el estado de Veracruz?

Justificación

El crecimiento y la rápida evolución tecnológica que ha experimentado la industria en general y en particular la industria química, ha favorecido el incremento de inventarios de materiales peligrosos en las instalaciones y en diversos medios de transporte, lo que provoca un aumento de la probabilidad de ocurrencia de accidentes con un notable impacto sobre las personas, el medio ambiente y las instalaciones.

Desde la década de los 20's, el mundo se ha visto afectado por varios accidentes de grandes proporciones, que han involucrado productos químicos.

Tabla 1 Accidentes en la Industria Química.

Lugar	Año	No. muertos	No. evacuados	Costo M. €
Flixborough (Inglaterra)	1974	28	0	200
Tacoa (Venezuela)	1982	150	4,000	84
San Juanico (México)	1984	650	0	32
Bhopal (India)	1984	3200	0	470
Chernobyl (Rusia)	1986	31	336,000	949
Piper Alpha	1988	165	61 sobrevivientes	1399
Phillips 66 (E.U.)	1989	23	1,300	959
Exxon Valdez (Alaska) ¹	1989	impacto ecológico	0	N/D
Cactus	1996	7	0	163
BP Texas city refinery explosion²	2005	15	0	N/D

Fuente: Efthimia K. Mihailidou, Konstantinos D. Antoniadis, Marc J. Assael. (2012). The 319 Major Industrial Accidents Since 1917. International Review of Chemical Engineering (I.RE.C.H.E.), 4, 529-540.

1. <http://www2.epa.gov/aboutepa/exxon-valdez-oil-spill>
2. <http://www.csb.gov/bp-america-refinery-explosion/>



México, no ha sido la excepción, el 19 de noviembre de 1984, sucedió la peor tragedia en la historia de la empresa Petróleos Mexicanos, la explosión de un depósito de gas en San Juanico, en el Estado de México, vecino al Distrito Federal, dejó, según fuentes oficiales, medio millar de muertos, aunque de manera extraoficial se habló de más de 2 mil.

El Instituto Nacional de Ecología (INE), a través del Centro de Orientación para la Atención de Emergencias Ambientales (COATEA), supervisado por la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), clasifico los materiales peligrosos involucrados con mayor frecuencia en accidentes en distintos procesos que se realizan en México, en la tabla 2, se muestran dichas sustancias.

Tabla 2 Materiales peligrosos involucrados en accidentes (1996-2002).

Material peligroso	%
Petróleo (Crudo)	42.08
Gasolina	7.83
Diésel	6.8
Combustóleo	5.39
Amoniaco	4.05
Gas L.P.	3.19
Gas natural Aceites	2.3
Ácido sulfúrico	2.27
Solventes orgánicos	2.26
Subtotal	77.29
Otros materiales	27.71
Total	100

Fuente: Centro de Orientación para la atención de emergencias (COATEA) /PROFEPA

Conforme a lo señalado en la tabla 2, los hidrocarburos (Petróleo crudo, Gasolina, Diesel, Combustóleo, Gas natural, Gas LP y solventes orgánicos) constituyen el material peligroso que



con mayor frecuencia estuvo involucrado en accidentes, representando el 69.8% del total de las emergencias ambientales. Otras sustancias diferentes a los hidrocarburos, también frecuentes en emergencias ambientales son: el amoniaco, ácido sulfúrico, solventes orgánicos, ácido clorhídrico, hidróxido de sodio y cloro.

De acuerdo con lo anterior, en la Tabla 3 se enlistan algunos de los accidentes que se han presentado en la industria petrolera nacional, con efectos sobre el personal, el medio ambiente y las instalaciones.

Tabla 3 Accidentes en la industria petrolera nacional.

No	Lugar	Accidente	Año	No. Muertos	No. Lesionados
1	Planta Clorados 3, Mexichem, Coatzacoalcos, Veracruz	explosión	may-16	24	136
2	Abkatún A , Sonda de Campeche, Golfo de México	incendio	feb-16	3	7
3	Planta hidros-1, de la Refinería Miguel Hidalgo, Tula Hidalgo.	incendio	sep-15	0	1
4	Planta alquiler; refinería Antonio Dovalí Jaime Salina Cruz, Oaxaca.	explosión incendio	nov-15	0	21
5	Planta coquizadora, Refinería Francisco I. Madero, Cd. Madero Tamaulipas	explosión	ago-14	4	11
6	Centro Receptor de gas y condensados de Pemex Exploración y Producción, Reynosa Tamaulipas	explosión	sep-12	33	46
7	Planta viscorreductora, de la Refinería Miguel Hidalgo, Tula Hidalgo.	explosión	jul-11	2	1
8	Oleoducto, San Martin Texmelucan, Puebla	explosión incendio	dic-10	27	32
9	Planta hidrodesulfuradora, de la Refinería Ing. Héctor R. Lara Sosa. Cadereyta, Nuevo León	explosión	sep-10	2	10
10	Planta de líquidos 1, complejo procesador Cactus, Reforma Chiapas	explosión	nov-08	2	3
11	Planta Criogénica, complejo procesador Cactus, Reforma Chiapas	explosión	jul-96	6	39

Fuente extra oficial:

- 1.-<http://www.excelsior.com.mx/nacional/2016/04/22/1088166>
- 2.-<http://expansion.mx/negocios/2016/02/07/incendio-plataforma-abkatun-a-muertos-heridos-victimas>
- 3.-<http://www.elfinanciero.com.mx/economia/pemex-atiende-incendio-en-refineria-de-tula.html>
- 4.-http://www.milenio.com/estados/explosion_refineria_Salina_Cruz-explosion_Oaxaca-heridos_refineria_Salina_Cruz_0_634136700.html



- 5.-<http://www.m-x.com.mx/2014-08-10/suman-tres-trabajadores-muertos-por-un-flamazo-en-una-refineria-de-pemex/>
6.-<http://www.excelsior.com.mx/nacional/2013/03/18/889593> y
<http://www.eluniversal.com.mx/articulo/estados/2015/09/17/pemex-refuerza-acciones-preventivas-3-anos-de-explosion-en-reynosa>
7.-<http://expansion.mx/nacional/2011/07/30/incendio-en-una-refineria-de-pemex-en-hidalgo-cause-dos-muertos>
8.-<http://eleconomista.com.mx/sociedad/2010/12/19/explosion-ducto-pemex-dejo-27-muertos>
9.-<http://archivo.eluniversal.com.mx/notas/707053.html>
10.-<http://www.jornada.unam.mx/2008/11/18/index.php?section=estados&article=034n1est>
11.-<http://www.jornada.unam.mx/1996/07/27/CACTUS00-2607.html> y <http://laotraopinion.com.mx/2015/11/12/explosiones-de-pipas-el-recuento/>

La estimación del alcance de los fenómenos peligroso que vulneran a los trabajadores, basado en consecuencias en el diseño de arreglo de equipo en proyectos nuevos de plantas industriales que minimizaran los daños por incendio y o explosión al personal y a las instalaciones, también es aplicable a la evaluación de la ubicación de edificios normalmente tripulados como son cuartos de control para determinar las características de diseño de dichos recintos (carga explosiva) y cumplan con su función de protección al personal, determinar las necesidades de protección pasiva contra fuego para resguardar los elementos estructurales, contra la exposición al calor intenso y prolongado que podría causar el colapso de los equipos sin protección y conducir a la propagación de líquidos inflamables y pérdida sustancial de la propiedad.

Debido a la lo anterior, se establecieron como objetivos de este trabajo de tesis, los siguientes objetivos:

Objetivo general

Identificar y evaluar el riesgo de incendio y/o explosión, en la planta Hidrotratadora de gasolina, ubicada en el estado de Veracruz.

Objetivos particulares:

- 1.- Identificación de escenarios de riesgo de incendio y/o explosión de la planta hidrotratadora de gasolina.



- 2.- Evaluar las consecuencias de los escenarios de liberación de materiales peligrosos.
- 3.- Estimar las frecuencias de los eventos accidentales.
- 4.- Cuantificar el riesgo de incendio y/o explosión

El procedimiento para el desarrollo del proyecto consistió, en la aplicación de la metodología de análisis de riesgo cuantitativo (QRA), que es una herramienta que permite evaluar la seguridad global en la industria química y de procesos. Es un método cuantitativo para determinar el riesgo y la identificación de áreas de costo-efectivo en la reducción de riesgos y que ha evolucionado desde la década de 1980, a partir de sus raíces en la industria nuclear, aeroespacial y de la electrónica.

El estudio se realizó en la planta de hidrotreamiento de gasolina objeto de estudio, en la que se determinó el riesgo individual por incendio y/o explosión por el procesamiento de gasolina catalítica componente principal de las gasolinas comerciales, mediante la metodología antes mencionada.

El trabajo de tesis contiene 6 capítulos, los cuales son:

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES. Aquí se presentan los estudios previos realizados en cuanto a riesgo de Incendio y/o explosión, y el tratamiento que se ha dado, se realizó una breve descripción de la planta estudiada y de sus condiciones hasta el momento de la investigación.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO. Se describen los aspectos relacionados con la evaluación de riesgos, generalidades de los incendios, explosiones, efectos térmicos sobre los seres humanos, efectos por explosiones en seres humanos, metodologías de evaluación del riesgo, marco legal.



CAPÍTULO 3. PROCEDIMIENTO O MÉTODO. Se describe la aplicación de la metodología Análisis de riesgo cuantitativo (QRA), explicando cuales son los pasos para la aplicación y determinación del riesgo.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS. Se presenta la aplicación del Análisis de riesgo cuantitativo (QRA) al proceso evaluado así como su explicación.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES. Se presentan las conclusiones finales del trabajo obtenidas a partir de los resultados generados durante la investigación.

CAPÍTULO 6. RECOMENDACIONES. Se presentan propuestas viables que permitan mejorar el carácter operativo del proceso en cuestiones relacionadas a la disminución del riesgo de incendio y/o explosión.





CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

1.1 Estudios previos

De la revisión realizada de acuerdo con el tema de investigación, se obtuvieron trabajos previos, relacionados con las metodologías de evaluación de riesgos de incendio y explosión, métodos para la evaluación de efectos térmicos y sobrepresión que afectan a los trabajadores expuestos. Cabe mencionar que los trabajos consultados se realizaron en empresas de ramos diferentes al de este trabajo, pero que guardan cierta similitud en algunos de los aspectos de evaluación considerados en el presente. A continuación, se mencionan los trabajos:

Pritchard (1989), realizó “Una revisión de los métodos para predecir el daño debido a las ondas de choque generadas por explosiones de nubes de vapor”, con el objeto de revisar y discutir las limitaciones de los métodos que actualmente se disponen y se encuentran en uso durante las evaluaciones de seguridad de las instalaciones peligrosas, así como durante el diseño de este tipo de instalaciones, para predecir el daño por explosión a estructuras y equipos; para lo cual, presenta los conceptos y parámetros empleados para caracterizar la ondas de choque, tales como: el valor Pico (máxima sobre presión obtenida), duración, impulso, presión dinámica.

Posteriormente, analizó los métodos como son: el método equivalente-TNT, que es ampliamente utilizado por su relativamente facilidad de uso, así como a la razonable predicción de efectos de la onda de choque en el campo lejano, debido a que el comportamiento de esta tiende a la idealidad, por otra parte el método de TNO multi-energía, estima que la fuerza de choque que es generado por la cantidad de la nube que está parcialmente confinada, mientras que el resto de la nube, simplemente ardera sin ninguna contribución significativa sobre la magnitud de la onda de choque. Esta revisión dio como resultado que el principal problema en la estimación de los daños debido a la explosión de nube de vapor, está en establecer las características de la onda de choque. Por lo anterior el método equivalente-TNT, por su facilidad de uso, es el más empleado por a los analistas de riesgos, a pesar del hecho de que la onda de choque de un alto explosivo como TNT, difiere notablemente de la onda de choque producida por



una explosión de nube de vapor. Por lo que concluyo, que no se recomienda el uso del método equivalente-TNT, en su lugar recomienda emplear el método de TNO multi-energía, que es capaz de predecir la forma de la onda de choque, impulso así como la sobrepresión.

Pietersen (1990), describió que en las últimas décadas, ha aumentado el uso de estudios de seguridad y evaluación de riesgos, en las procesos productivos, transporte y almacenamiento de materiales peligrosos, los cuales fundamentan la toma de decisiones relacionadas a esta actividades, para lo cual se han desarrollado modelos matemáticos para describir la consecuencia de la liberación accidental de dichos materiales, como son la sobrepresión debida a explosión, radiación térmica por incendios, gases en la atmósfera. Sin embargo enfatizó que estas evaluaciones de consecuencias deben ligarse a los efectos sobre las personas y/o instalaciones. Proponiendo el enfoque Probit para calcular el porcentaje de personal expuesto de acuerdo con los efectos adversos por las consecuencias antes mencionadas.

Guoshum, Z. (2000) en China, estudio cinco accidentes industriales tipo explosión, de los cuales determinó que las causas de estos eventos son: (A) conocimiento inadecuado de la seguridad de sus puestos de trabajo; (B) inadecuada comprensión y el respeto de los peligros de los materiales y procesos que operaban; (C) Desconocimiento de las operaciones normales y de emergencia, (D) violación de procedimientos para las actividades de seguridad y programas de ejecución.

El desarrollo industrial, favorece una diversificación de riesgos, por lo cual, Tixier, J., Dusserre, G., Salvi, O., Gaston, D. (2002) estudiaron 62 metodologías de análisis de riesgo que se han desarrollado en los últimos diez años. Los análisis de riesgo permite una identificación exhaustiva de posibles fuentes peligrosas para evitar situaciones de accidente y para evaluar el impacto potencial sobre las personas, el ambiente y las instalaciones con el fin de proponer prevención o protección (Lagadec, 1980). Se clasifican estas metodologías en cuatro clases (cualitativos, cuantitativo, determinístico y probabilístico), concluyendo que una combinación de los métodos determinístico y probabilístico son usados para analizar la totalidad de la instalación industrial.



La revista Seguridad y Salud en el Trabajo, publicó el “Análisis comparativo de los principales métodos de evaluación del riesgo de incendio” elaborado por Fuentes Peña, J. y Rubio Romero, J. C. (2003), con el fin de dar a conocer las fortalezas y debilidades de los distintos métodos de evaluación utilizados en España, el trabajo se basó en los métodos: Intrínseco, MESERI, G. PURT, GRETENER, ERIC y FRAME, concluyendo que debido a las particularidades de los establecimientos industriales y los objetivos de protección, el uso combinado de métodos brindara niveles de protección más adecuados y una visión más adecuada del riesgo de incendio.

El análisis histórico de 242 accidentes en tanques de almacenamiento ocurrido en los últimos 40 años en instalaciones industriales, realizado por Chang, J. I., Lin, C. C. (2006) determinó que el 74% de estos accidentes, ocurrieron en refinerías, terminales de almacenamiento.

Donde el 85% total de los accidentes, el impacto de rayos fue la causa más frecuente relacionada con incendio y explosión, el 15% restante de los accidentes, fueron errores operacionales, falla del recipiente e instrumentación.

Lobo Benítez, A. L. (2010), realizó su trabajo de tesis, con el objeto de proponer lineamientos en materia de prevención, mitigación y gestión de emergencias en instalaciones industriales que procesan o producen materiales peligrosos, ante desastres tecnológicos, como son: incendios, explosiones o dispersión de nubes tóxicas; para lo cual definió como caso de estudio el proyecto de ampliación del Complejo petroquímico Morón en Venezuela. Este trabajo llevó a cabo la identificación de amenazas tecnológicas asociadas a la ubicación y población aledaña de las instalaciones industriales, posteriormente, elaboró la evaluación del riesgo en el contexto de los Estudios de Impacto Ambiental, mediante la evaluación de consecuencias con el software ALOHA. Finalmente concluyó que existen deficiencias en la gestión de riesgo tecnológico en la industria química las cuales se fundamentan en razones de tipo técnico,



económico, falta de experiencia y deficiencia en el establecimiento de los alcances de los estudios de impacto ambiental.

En su trabajo de investigación, Santos, Reyes, G. C. (2010), empleó la metodología de análisis de riesgo individual, para determinar la probabilidad de fatalidad de trabajadores de mantenimiento de ductos. Para lo cual empleó el criterio de aceptabilidad del riesgo empleado en Holanda de $RI=1 \times 10^{-5}$.

En su trabajo de tesis Casillas Martínez G. H. (2011), realizó una evaluación de riesgo de incendio de una Escuela de nivel superior, mediante el método Gretener el cual considera el tipo de construcción, la actividad, cantidad de personas, los dispositivos de protección con los que cuenta el inmueble, el cual compara con el riesgo determinado por la normativa NOM-002-STPS-2010, con el fin de proponer medidas de protección que reduzcan el riesgo.

En el caso de estudio referente al proceso de producción de benceno, Hassim, M. H., Hurme, M., Amyotte, P. R., y Khan, F. I. (2012), determinaron que las emisiones fugitivas están entre las principales fuentes de liberación de materiales peligrosos, representando serios problemas a la seguridad y al medio ambiente. Las principales fuentes contribuyentes de emisiones fugitivas son:

- 1.- Las válvulas representan un 50%
- 2.- Bombas sin sellos mecánicos correspondiendo al 30%
- 3.-Las uniones bridadas contribuyen con el 8% de las emisiones.

Soman y Sundararaj (2012), efectuaron una evaluación de consecuencias con el fin de estimar el impacto a las personas e instalaciones, debido a la sobrepresión generada por la explosión de gas hidrógeno en una planta de síntesis de ácido clorhídrico (HCl); para lo cual se planteó el escenario de liberación de gas hidrógeno de un contenedor de 120 m^3 , se calculó la sobrepresión con los métodos: equivalente TNT, TNO multi-energía, modelo Baker-Strehlow y ecuaciones Probit para determinar la vulnerabilidad al personal y daño a equipos.



Esta evaluación mediante los modelos antes mencionados, obtiene los resultados de sobrepresión a un radio de 25 m del centro de explosión, cuya distancia se encuentra el personal laborando, siendo 0.13 bar (TNT), 0.4 bar (TNO) y 0.3 bar (B-S), respectivamente, con dichas sobrepresiones y la ecuación Probit se obtiene el porcentaje de letalidad debido a daño pulmonar de 99% a una distancia de 8 m alejado del centro de explosión y de 8% de letalidad a 25m, el porcentaje de mayor daño estructural es de 100% a 12 m del centro de explosión. Concluyendo que el rango de fatalidad del personal que se encuentra en un radio de 25 m al centro de explosión, variara de un 8% a 100%, de acuerdo con los valores de obtenidos de sobrepresión mediante los modelos empleados.

Durante el diseño de una unidad flotante de producción, almacenamiento y transferencia de gas natural licuado, Dan, S., Lee, Ch. J., Park, J, Shin, D. y Yoon, E. S. (2014), mediante un análisis de riesgo cuantitativo QRA, determinaron el riesgo de incendio y explosión en un valor de 8.56×10^{-4} el cual es tolerable bajo los criterios de ALARP (tan bajo como sea razonablemente factible).

1.2 Descripción de la instalación Industrial

La planta hidrotratadora de Gasolinas, se encuentra ubicada en el estado de Veracruz, está diseñada para procesar 25,000 Barriles de gasolina catalítica amarga, proveniente de las Plantas Catalíticas. La planta tiene la función de producir gasolina con un bajo contenido de azufre de 10 ppm en peso, la cual constituye uno de los principales componentes en la formulación final de las gasolinas comerciales.

La planta fue diseñada para operar en forma continua por 36 meses como mínimo, sin reemplazo de catalizador de las columnas de destilación catalítica.



La planta recibe hidrógeno que proviene de tres fuentes alternas: hidrógeno del área 3 (procedente de las plantas Reformadoras RBTX y RNP-1) e hidrógeno del área de la planta purificadora de hidrógeno PSA.

El proceso consta principalmente de:

- ❖ Columna de destilación catalítica de hidrogenación.
- ❖ Columna de destilación catalítica para hidrodesulfuración.
- ❖ Reactor de pulido.
- ❖ Separador de H₂S.
- ❖ Agotador de H₂S.
- ❖ Columna Estabilizadora de Naftas.
- ❖ Calentador a fuego directo.
- ❖ Compresor de gas de recicló a columna de destilación catalítica de hidrogenación.
- ❖ Compresor de gas de recicló Columna de destilación catalítica para hidrodesulfuración.
- ❖ Columnas absorbedoras de amina.

Los materiales peligrosos que se manejan en esta planta son:

- Gasolina catalítica.
- Hidrógeno.
- Ácido sulfhídrico.

La planta, cuenta con los siguientes medios de seguridad:

- Sistema de Gas y Fuego, el cual consta de detección de gases tóxicos, detección de mezclas explosivas, detección de gas hidrogeno, detección de flama.
- Red contra-incendio la cual cuenta con hidrantes, hidrantes monitores y tomas de agua contra-incendio para camiones.
- Sistemas de aspersión automáticos.



- Extintores portátiles de polvo químico seco.

El personal de la planta labora tres turnos de 8 hr cada uno (1er turno 0:00 hr a 8:00 hr, 2do turno de 8:00 hr a 16:00 hr y 3er turno de 16:00 hr a 0:00Hr), la tripulación por turno es de 15 personas.

El personal de mantenimiento ingresa durante los turnos 2 y 3, por lo que en ocasiones en el interior de la planta hay aproximadamente 50 personas.

El personal que labora en esta planta cuenta con ropa de trabajo (pantalón y camisola) de tela de algodón y como equipo de protección personal básico cuenta con casco, lentes de seguridad, guantes, y protección auditiva.

El centro de trabajo cuenta con una Central contra-incendio, con disponibilidad de personal en tres turnos, el personal de guardia, tiene por jornada el siguiente:

- 1 Jefe de guardia.
- 1 encargado de bodega.
- 5 operadores de camiones contra incendio.
- 18 ayudantes contra incendio.

Durante el turno 2 en el horario de 8:00 a.m. a 04:00 p.m., se tienen adicionalmente 14 personas más entre cabos y ayudantes contra incendio, el personal llega hasta 39 trabajadores. Adicionalmente en la Central contra-incendio, se tienen resguardados entre otros, los siguientes equipos para la atención de emergencias:

- 5 Unidades contra incendio.
- 2 Unidades de transporte de tres y media toneladas.
- 1 pipa para transporte de agua.



CAPÍTULO 2. MARCO TEORICO

En este capítulo se plasman los conceptos relacionados con los peligros, accidentes mayores y las metodologías de los análisis de riesgos, las cuales evalúan de forma cualitativa o cuantitativa, las situaciones potencialmente peligrosas y el impacto que puede tener en el personal, el medio ambiente y las instalaciones.

Con la revisión del marco legal referente a la realización de estudios para la identificación de peligros, y de las diversas metodologías existentes de análisis de riesgos para la evaluación de escenarios accidentales, particularmente de los que pueden ocurrir en aquellas industrias que manejan materiales combustibles, inflamables, corrosivos, entre otros, se puede determinar las medidas de seguridad más eficientes que permitan brindar protección al personal y mitigar los impactos en las instalaciones y el medio ambiente.

2.1 Anatomía de un incidente de proceso

El potencial de accidentes industriales que se ha suscitado a lo largo del tiempo ha puesto de manifiesto la necesidad de contar un enfoque sistemático y claramente definido para conocer a gran profundidad como es que se lleva a cabo la secuencia de incidentes de proceso que dan lugar a los accidentes, con el fin de mejorar la seguridad y gestionar el riesgo de sus operaciones.

A continuación, la Figura 1 representa la secuencia de incidentes de proceso.



Figura 1 Secuencia de incidentes que desencadena un accidente.

Fuente: Department of energy, (2004).



Un *peligro* es una condición física o química que tiene el potencial de causar daños a las personas, los bienes o el medio ambiente (CCPS, 2008).

Un *incidente* se define como un acontecimiento imprevisto o secuencia de eventos que ya sea provocado o que tenían el potencial para causar efectos adversos. Por lo tanto, una secuencia de incidentes es una serie de eventos que pueden transformar la amenaza que representa un proceso peligroso en un hecho real (CCPS, 2008).

Las evaluaciones del peligro, por lo general se centran en las posibles causas y consecuencias de eventos episódicos, tales como incendios, explosiones y emisiones imprevistas de materiales peligrosos, en lugar de los posibles efectos de las condiciones que pueden existir de forma rutinaria como un contaminante emitido desde un punto de emisión registrada. Las evaluaciones de riesgo también se centran en formas que fallan los equipos, problemas de software, errores humanos, y factores externos (por ejemplo, Clima) pueden dar lugar a incendios, explosiones y emisiones de material tóxico o energía (CCPS, 2008).

Un proceso peligroso representa una amenaza al personal, a la propiedad y al medio ambiente. Los procesos peligrosos están siempre presentes cuando materiales peligrosos y condiciones peligrosas del proceso existen. Bajo condiciones normales, estos peligros son todos contenidos y controlados. (CCPS, 2008).

El primer evento en una secuencia de incidentes es llamado *causa iniciadora*, también referido como evento iniciador o, en el contexto de la mayoría procedimientos de evaluación de peligros, solamente la causa. Los tipos de eventos que pueden iniciar secuencias de incidentes son generalmente fallas de equipos o software, errores humanos, y eventos externos. La tabla 4 da algunos ejemplos. (CCPS, 2008).



Tabla 4 Elementos de incidentes de procesos

Peligros en los procesos	Causas iniciadoras	Incidente resultante
Inventarios significativos de : Materiales inflamables Materiales combustibles Materiales inestables Materiales corrosivos Asfixiantes Materiales sensibles a impactos Materiales altamente reactivos, materiales tóxicos Gases inertes Polvos combustibles Materiales pirofóricos Condiciones físicas: Altas temperaturas Temperaturas criogénicas Alta presión Vacío Ciclos de presión Ciclos de temperatura Vibración Radiación ionizante Alto voltaje/corriente Masa almacenada Movimiento de materiales Gases licuados	Falla de contención: Tuberías, ductos, tanques, recipientes, contenedores, mangueras flexibles, mirillas, juntas/sellos. Falla de equipos: Bombas, compresores, agitadores, válvulas, instrumentos, sensores, fallas de control, disparos en falso, venteos, relevos. Pérdida de servicios: Electricidad, nitrógenos, agua, refrigeración, aire, calor, transferencia de fluidos, vapor, ventilación. Errores Humanos: Operación Mantenimiento. Eventos externos: Impacto de vehículos Condiciones climáticas extremas Impacto de incidentes cercanos Vandalismo/sabotaje.	Eventos de pérdida: Descarga o liberaciones Fuegos: fuego de alberca, dardos de fuego, flamazos Bolas de fuego Explosiones: Explosiones confinadas Explosiones de nubes de vapor no confinadas Explosión ruptura de recipientes BLEVES Explosión de polvos Detonación en fase de condensación Impactos Tóxico, corrosivo, Térmico, sobrepresión, proyectiles, y otros efectos en: Comunidad Trabajadores Ambiente Activos de la compañía Producción

Fuente: Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2008). *Guidelines for hazard evaluation procedures*. New York: Wiley.

La causa iniciadora, puede entenderse considerando la anatomía de un incidente desde una perspectiva de operaciones, tal como se presenta en la Figura 2. En el modo de operación **Normal**, todos los peligros de proceso, están contenidos y controlados, y la instalación está operando dentro de los límites establecidos y de acuerdo con los procedimientos de operación establecidos. Los objetivos operacionales durante el funcionamiento normal se pueden resumir en la optimización de la producción y el mantenimiento de la instalación dentro de los límites de los procedimientos normales de funcionamiento y límites. Sistemas clave involucrados en mantener



la instalación operando normalmente incluyen el sistema de contención primaria que consiste típicamente en tuberías y recipientes, el sistema básico de control de proceso (BPCS) incluyendo los sensores y actuadores, equipos de proceso funcional tales como bombas y columnas de destilación, y la ejecución de tareas operativas de acuerdo con los procedimientos de operación establecidos. Estos sistemas clave se apoyan en actividades tales como inspecciones, pruebas funcionales, mantenimiento preventivo, capacitación de los operadores, la gestión del cambio, y el control de acceso a las instalaciones (CCPS, 2008).

Una *causa iniciadora* tiene como resultado un cambio de normal a un modo de operación anormal, tan pronto como la operación se aparta de sus procedimientos operativos establecidos o límites seguros de operación. En el contexto de los procedimientos de evaluación de riesgos, este modo anormal se la denomina una *desviación*. Por ejemplo, la pérdida de suministro de agua de refrigeración a un sistema de reacción exotérmica puede ser una causa iniciadora para una reacción descontrolada secuencia de incidentes. Tan pronto como el suministro de agua refrigerante (presión y flujo) cae por debajo del límite mínimo establecido, este puede ser considerado como una causa iniciadora, y la planta está en una "situación anormal." El objetivo operacional de la planta cambia cuando se detecta una situación anormal. En lugar de la meta de mantener la planta operando dentro de los límites normales, el objetivo operacional queda regresar a la planta a la operación normal, si es posible; y, si esto no es posible, llevándola a un estado de seguridad tales como el cierre de la unidad antes de que ocurra un evento de pérdida (CCPS, 2008).

Si la situación en este ejemplo se permite que persista sin corregirlo, puede dar lugar a una reacción fuera de control, con los posibles resultados de una descarga a la atmósfera de la válvula de relevo (si el sistema está configurado) o una ruptura del recipiente debido al exceso de presión. En este punto, los cambios de estado operativo de una situación anormal -que puede ser capaz de ser corregidos y devueltos a su estado bajo control- a una situación de emergencia. (El término "emergencia" en este contexto se refiere a la modalidad de operaciones de emergencia después de un evento de pérdida se produce. Los procedimientos de emergencia en realidad pueden ser activadas incluso antes de que el caso de ruptura del recipiente o de descarga alivio.)

La meta operativa cambia de nuevo en una situación de emergencia, con el objetivo ahora de minimizar las lesiones y pérdidas (mitigar los impactos de eventos de pérdida) (CCPS, 2008).

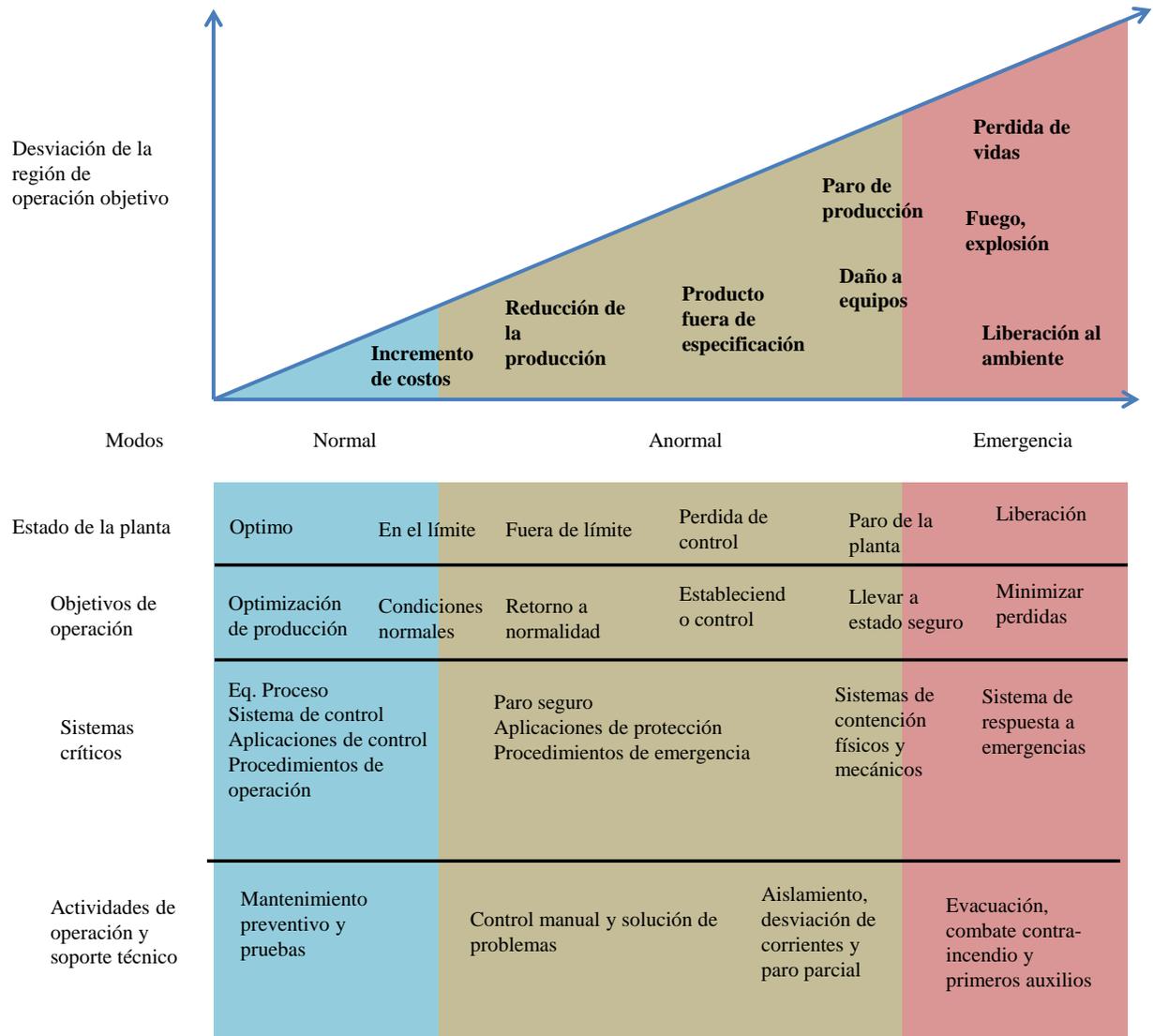


Figura 2 Anatomía de un incidente catastrófico.

Recuperada de <https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-publications/intech-magazine/2010/february/web-exclusive-the-human-side-of-safety/>

En la anatomía de un incidente, el comienzo de una situación de emergencia que se denomina el evento de pérdida (Figura 3), ya que es probable que se produzca algún grado de pérdida o daño una vez que se ha producido un evento de pérdida. El evento de pérdida es el punto del tiempo en una secuencia de incidente cuando se produce un evento físico irreversible que tiene el potencial de impacto de pérdidas y daños. Los ejemplos incluyen la apertura de un dispositivo de relevo de emergencia del tipo no cierre, como es el disco de ruptura, la liberación de un material peligroso hacia el medio ambiente, la ignición de vapores inflamables o una nube de polvo inflamable, y la ruptura por sobre presurización de un tanque o recipiente. Otros ejemplos se dan en la Tabla 4. Tenga en cuenta que un incidente puede implicar más de un evento de pérdida, como un derrame de líquido inflamable (primer evento de pérdida), seguido de la ignición resultando en un flamazo (*flash fire*) y el fuego de charco (*pool fire*) (segundo evento de pérdida) que calienta a los recipientes adyacentes así como a su contenido, hasta el punto de ruptura (tercer evento de pérdida) (CCPS, 2008).

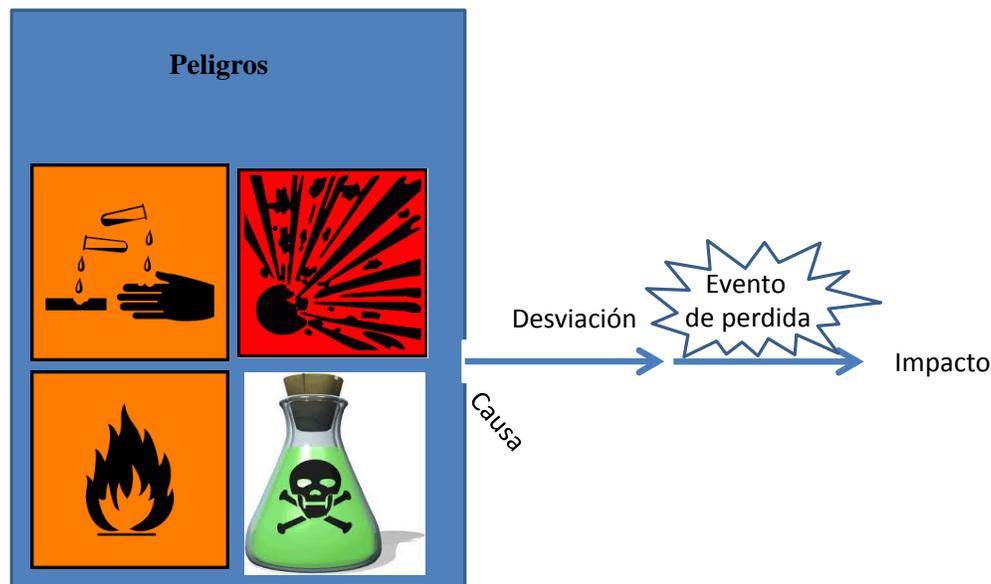


Figura 3 Secuencia básica de un incidente sin salvaguardas.
Fuente: (CCPS, 2008).

La severidad de las consecuencias de los eventos de pérdida, es denominada el *impacto*. El cual es una medida de la pérdida final y el daño de un evento de pérdida. Este puede ser expresado en términos de número de lesionados y/o decesos, extendiéndose al daño ambiental,



y/o magnitud de pérdidas tales como daños a la propiedad, pérdidas materiales, pérdida de producción, pérdida de cuota de mercado u costos de recuperación (CCPS, 2008).

La descripción total de una posible secuencia de incidentes es un *escenario*. Un escenario es un evento no planeado o secuencia de incidentes que resulta en un evento de pérdida y sus impactos asociados, incluyendo el éxito o falla de las salvaguardas involucradas en la secuencia de incidentes. Por lo tanto cada escenario inicia con una causa iniciadora como previamente se describió, y termina con uno o más incidentes resultantes. Los resultados pueden involucrar varios fenómenos físicos o químicos, los cuales pueden ser evaluados usando metodologías de análisis de consecuencias, para determinar los impactos de los eventos de pérdida (CCPS, 2008).

Los Métodos de evaluación de peligros, permiten ayudar a los usuarios a entender el significado de las secuencias de incidentes potenciales asociados con un proceso o actividad. Esta comprensión lleva a la identificación de las formas de reducir la frecuencia y gravedad de los incidentes potenciales, mejorando así la seguridad de las operaciones de proceso (CCPS, 2008).

2.2 Análisis de riesgos

De acuerdo con Nolan (2014), el análisis de riesgos es un término que se aplica a una serie de técnicas de análisis utilizados para evaluar el nivel de las situaciones potencialmente peligrosas. Técnicamente, el análisis de riesgos es un instrumento, que mediante la probabilidad y las consecuencias de los incidentes son evaluadas las implicaciones de los peligros. Estas técnicas pueden ser cualitativas o cuantitativas, dependiendo del nivel de evaluación requerido.

El análisis de riesgos se define por cuatro etapas principales:

- 1.- Identificación de ocurrencia de incidentes o escenarios
- 2.- Estimar la frecuencia de la ocurrencia.
- 3.-Determinar las consecuencias de cada ocurrencia.
- 4.-Desarrollar el estimado del riesgo asociado con la frecuencia y consecuencia



2.3 Metodologías de análisis de riesgos

En la tabla 5 se muestra la clasificación de las metodologías de análisis de riesgos que de acuerdo con Nolan (2014), se dividen de la siguiente manera:

Tabla 5 Metodologías de análisis de riesgo.

Cualitativos	Semicuantitativos	Cuantitativos
Método Análisis histórico de accidentes (AHA) Método Análisis preliminar de peligros (PHA) Método ¿Qué pasa si...? (What if...?) Método Lista de verificación (Check list) Método Análisis de modo falla y efecto (FMEA) Método Análisis de peligro y operabilidad (HAZOP)	Método índice Dow Método índice Mond	Árboles de fallas (FTA) Árboles de eventos (ETA) Análisis cuantitativo de riesgos (QRA)

2.3.1 Métodos cualitativos para el análisis de riesgos

De acuerdo con Storch. J. M, & García. T. (2008), los métodos cualitativos de riesgo son técnicas de análisis crítico que no recurren al análisis numérico. Su objetivo principal es *identificar*:

- A) Riesgos
- B) Efectos: Incidentes y accidentes cuando se materializan los riesgos
- C) Causa: orígenes o fuentes de los riesgos.

Emplean diferentes herramientas lógicas y auxiliares.

Algunos de ellos establecen estructuras lógicas secuenciales, causas/riesgo/efectos que, además de identificar, sirven como trama para análisis semicuantitativos o cuantitativos posteriores.



En otros casos el barrido sistemático de causa/riesgos/efectos conduce a detectar parte de los sistemas (de proceso, de instrumentación) de equipo, etc. Que, por ser complejas y/o delicadas requieren el análisis mediante métodos más penetrantes o más cuantitativos.

2.3.1.1 Análisis histórico de accidentes

El objetivo primordial de la metodología, para detectar los peligros presentes en una instalación, por comparación con otras similares que hayan tenido accidentes registrados en el pasado. Analizando esos antecedentes es posible conocer las fuentes de peligro, estimar el alcance de los daños e incluso, si la información es suficiente, estimar la frecuencia de ocurrencia (Carol, 2001).

Para llevar a cabo estos trabajos se dispone de bancos de datos informatizados, recopilaciones bibliográficas de accidentes o incluso de la propia experiencia siniestral de la empresa (Carol, 2001).

Es una metodología simple y económica, ya que no compromete muchos recursos materiales o humanos. Su gran ventaja es que detecta peligros absolutamente reales, que ya en el pasado se han puesto de manifiesto. Sin embargo, las informaciones recogidas son limitadas dado que solo se registran los accidentes que acaban en eventos de relativa importancia y se obvian incidentes, potencialmente más peligrosos que los anteriores, pero que por circunstancias fortuitas favorables no desencadenan un gran accidente. Así mismo, las informaciones recogidas nos son completas y están afectadas de imprecisiones importantes, lagunas y datos confidenciales desconocidos (Carol, 2001).

2.3.1.2 Análisis preliminar de peligros

De acuerdo con Carol (2001), este método es similar al análisis histórico de accidentes, aunque no se basa en el estudio de siniestros previos, sino en la búsqueda bibliográfica de peligros que puedan hallarse en una nueva instalación a partir de productos químicos presentes. De forma no estricta se le suele denominar también “Análisis preliminar de riesgos”.



El procedimiento consiste en obtener información completa sobre materiales, sustancias, reactivos y operaciones previstas, comparar estos procesos con otros de los que se tenga experiencia anterior, adaptar esas semejanzas al caso actual y analizar las operaciones y equipos previstos desde el punto de vista de los peligros presentes en cada uno (toxicidad, corrosividad, carga energética, etc.) (Carol, 2001).

Los puntos críticos que se hayan detectado en el paso anterior deben ser objeto de un estudio técnico algo más detallado. Por últimos, como resulta lógico, deberán proponerse las medidas a adoptar para disminuir o eliminar los peligros detectados (Carol, 2001).

Es un procedimiento de análisis simple y económico, aunque no sistemático: es estrictamente cualitativo y depende en excesos de los conocimientos previos de los ejecutantes (Carol, 2001).

Resulta idóneo para instalaciones en fase de anteproyecto o ingeniería básica, cuando aún no se han desarrollado planos detallados de la instalación (Carol, 2001).

2.3.1.3 Método ¿Qué pasa si...? (What if..?)

El objetivo fundamental de este método es la detección y análisis de las desviaciones sobre los procesos y condiciones previstas, intentando evitar aquellos eventos que puedan resultar no deseables. Básicamente consiste en responder cualitativamente a una batería de preguntas de tipo “¿Qué pasa si...?”, en relación con la calidad o la concentración de las materias primas, o en relación con las variables de procesos o los servicios necesarios (Carol, 2001).

Para llevar a cabo este análisis de forma estructurada se recomienda seguir la línea de proceso, desde la recepción de materiales hasta la entrega del producto terminado. En una primera fase se pide a los participantes que planteen cualquier pregunta del tipo “¿Qué pasa si...?” en relación con cada unidad o etapa del proceso. Una vez recopiladas todas estas



cuestiones, se intentara dar respuesta a cada una de ellas, con la participación de especialistas (Carol, 2001).

Una vez identificados los peligros y sus posibles consecuencias, deben proponerse las medidas disponibles para minimizarlos, tales como alternativas en el proceso o modificaciones de la línea de producción (Carol, 2001).

Resulta un sistema muy creativo y de simple aplicación (y por lo tanto, económico). Sin embargo, aun realizándose de modo estructurado puede pasar por alto algunos peligros menos evidentes pero no por ellos menos graves (Carol, 2001).

2.3.1.4 Método Lista de verificación (check list)

Según, Marhavilas, P. K., Koulouriotis, D., Gemeni, V. (2011) esta metodología, es una evaluación sistemática contra criterios preestablecidos en forma de una o más listas de control, que son la enumeración de preguntas sobre el funcionamiento, organización, mantenimiento y otras áreas de la instalación preocupación de seguridad y representan el método más simple utilizado para la identificación de peligros. Un breve resumen de sus características es el siguiente: (i) Es un enfoque sistemático integrado en el conocimiento histórico incluido en la lista de verificación preguntas, (ii) Es aplicable a cualquier actividad o sistema, incluidas las cuestiones de equipo y las cuestiones de factores humanos, (iii) Se realiza generalmente por un individuo entrenado para entender las preguntas de la lista de verificación, o, a veces por un grupo pequeño, (iv) Se basa principalmente en entrevistas, reseñas de documentación e inspecciones de campo, (v) Genera listas cualitativas de conformidad y no conformidad, determinaciones con las recomendaciones para corregir las no conformidades, (vi) La calidad de la evaluación se determina principalmente por la experiencia de las personas que crean las listas de comprobación y la formación de los usuarios de la lista de verificación, (vii) Se utiliza para el análisis de alto nivel o detallado, incluyendo el análisis de causa raíz, (viii) Se utiliza con mayor frecuencia para guiar a los equipos de trabajo a través de la inspección de los sistemas críticos de



recipientes, (ix) También se usa como un suplemento a, o parte integrante de otro método, sobre todo de la metodología Que pasa si..?, para hacer frente a necesidades específicas.

2.3.1.5 Análisis de modo falla y efecto (AMFE)

En su trabajo de investigación Marhavilas et al. (2011), describe a esta metodología, como una técnica muy utilizada en los sistemas de calidad para identificar causas de falla.

El AMFE (FMEA) persigue establecer los posibles fallas de todo y cada uno de los elementos de la planta, analizando las consecuencias y considerando aquellas que puedan desencadenar un accidente, sugiriendo las medidas a adoptar para controlar tales situaciones de peligro (Marhavilas et al. 20011).

Se inicia el estudio identificando todos los equipos de la planta y estableciendo sus condiciones normales de proceso. A continuación para cada equipo, se detallan todos y cada uno de las fallas posibles y se analizan sus posibles consecuencias. Si se da la circunstancia de que una situación de fallas en un equipo produce una alteración en otro, debe trasladarse esta influencia al estudio del equipo afectado (Marhavilas et al. 20011).

Una vez conocidas las consecuencias, se deben proponer las acciones de mejora necesarias para eliminar o reducir el peligro.

En general para cada elemento se complementa una tabla con las siguientes columnas: elemento, descripción del equipo, modo de falla, forma de detección de la falla, efectos de la falla, y medidas correctivas (Marhavilas et al. 20011).

Requiere poca información y es relativamente económico. Es un análisis cualitativo (aunque admite cierto tratamiento semicuantitativo). Su principal inconveniente es que no contempla la posibilidad de fallas combinadas o en secuencia (Marhavilas et al. 20011).



2.3.1.6 Análisis de peligro y operabilidad (HAZOP)

Algunos autores, BESTRATÉN (1993) y STORCH (1998), Lo denomina AFO (Análisis funcional de operabilidad) aunque esta denominación no parece muy afortunada dado que se trata de una técnica de seguridad orientada a identificar circunstancias de peligro y de accidente, siendo la operación (la garantía de funcionamiento) un aspecto secundario. Es por ello que resulta más apropiada una traducción del tipo “análisis de peligros y operabilidad o análisis de peligros y funcionalidad”.

Esencialmente es un método muy similar al análisis de modo de falla y efecto (AMFE), descrito en el apartado anterior. El HAZOP, sin embargo es un método absolutamente sistemático, porque se controlan todas y cada una de las variables de proceso, en todo y cada uno de los equipos de la planta (Carol, 2001).

Su aplicación se fundamenta en la identificación de todos los parámetros del proceso (presión, temperatura, nivel, flujo, etc.) y sus condiciones de trabajo habituales, analizando de manera sistemática las desviaciones posibles.

Se inicia el estudio identificando los equipos y líneas principales de la planta. Para cada equipo o línea se relacionan todos los parámetros que afectan al sistema y se concretan sus condiciones habituales de proceso. A continuación y ayudados por unas palabra guía tales como NO, MÁS, MENOS, CONTRARIO, ADEMÁS, PARTE, DIFERENTE, se intenta incentivar la creatividad de los participantes en el estudio para que identifiquen cuáles serían las consecuencias de que la variable estudiada se desviara de la condición de proceso en la forma indicada por la palabra guía (más temperatura, menos pH, flujo inverso en la bomba, etc.) (Carol, 2001).

Para cada situación peligrosa identificada se propondrán las medidas correctivas oportunas en el sentido de evitar las desviaciones detectadas (Carol, 2001).



Este método requiere documentación completa y un conocimiento exhaustivo de la planta, de los productos utilizados y de las condiciones de proceso. Está especialmente adaptado a plantas relativamente complejas en las que otros métodos serían totalmente anárquicos. En particular, está mejor preparado para ser usado en plantas de proceso continuo, aunque se han desarrollado variantes para procesos por lotes. Su aplicación es económicamente costosa, dada la necesidad de involucrar en el estudio a un cierto número de profesionales calificados que deberán dedicarle tiempo considerable (Carol, 2001).

Existen en el mercado numerosos paquetes informáticos que apoyan la realización del análisis (Carol, 2001).

2.3.2 Métodos semicuantitativos

De acuerdo con Casal, J., Montiel, H., Planas, E., Vílchez, J.A. (1999), bajo este calificativo se agrupan un conjunto de métodos específicamente diseñados para evaluar el riesgo asociado a instalaciones químicas, tanto de proceso como de almacenamiento. Una parte importante del índice está orientada a identificar y valorar mediante factores, las condiciones que pueden determinar el que se produzca una liberación importante de energía en un corto período de tiempo. En la mayoría de los casos este factor energético viene definido por dos parámetros:

- Un factor de material, proporcional a la peligrosidad intrínseca del producto. Es un factor multiplicador que afecta en proporción lineal al valor del índice: si se duplica, el índice dobla su valor.
- Un factor de cantidad de energía, proporcional al producto:

$$(Cantidad\ de\ substancia,\ kg) \times (calor\ de\ combustión,\ kJ/kg)$$

2.3.2.1 Índice Dow

La guía Dow fue originalmente publicada en 1964 y ha pasado por siete ediciones (Dow Chemical Company, 1964, 1966; Dow chemical company, 1976, 1980).



El procedimiento es para calcular índice de fuego y explosión (IFyE) y para usar este para determinar medidas de protección contraincendio y, en combinación con un Factor de daño, para derivar la base Máxima Probable de daño a la propiedad (MPDP). Esto es entonces usado, en combinación con los créditos de control de pérdidas, para determinar el actual MPDP, el Máximo probable de daño a la propiedad (MPDP), y la pérdida por interrupción del negocio.

El procedimiento se resume como sigue: La información básica requerida por el IFyE es el plot plan y diagrama de flujo de la planta. Para las pérdidas económicas es necesario conocer el valor de la planta por unidad de cada área, o la “densidad de capital”, y el valor mensual de producción.

El IFyE es calculado como sigue. Primero un factor de material (FM) es obtenido. Entonces dos factores de penalización (F1 y F2), uno para el peligro en general del proceso (GPHs) y otro para peligros especiales del proceso (SPHs), respectivamente, son determinados y el factor de peligro de la unidad de proceso (PUHF) (F3), el cual es el producto de estos, es calculado. El producto del MF y PUHF es el IFyE (Mannan, 2013).

2.3.2.2 Índice Mond

El índice Mond de fuego, Explosión y toxicidad es una extensión del índice Dow. El índice Dow fue desarrollado en Mond Division of ICI.

Las principales modificaciones al método Dow, hechas en el Índice Mond, son las siguientes:

- 1.- Para permitir una gama más amplia de los procesos y las instalaciones de almacenamiento correspondientes;
- 2.- Para garantizar la transformación de los productos químicos que son reconocidos por tener propiedades explosivas;



- 3.- Para compensar las dificultades planteadas por el alto calor de combustión por unidad de masa de hidrógeno y para permitir que se hagan distinciones entre los procesos en los que un determinado combustible se hace reaccionar con diferentes reactivos;
- 4.- Incluir un número de tipo de proceso especial adicional de la consideración de amenazas que han demostrado por un estudio de las incidencias que afectan el nivel de riesgo de forma significativa;
- 6.- Para permitir que los aspectos de toxicidad que se incluirán en la evaluación;
- 7.- Para incluir una serie de factores para un buen diseño de sistemas de la planta y de la instrumentación de control / seguridad para permitir niveles de peligro realistas compensación que deben evaluarse para las unidades de plantas bajo niveles de características de seguridad que varía;
- 8.- Para indicar cómo los resultados de usar el método puede aplicarse lógicamente en el diseño de plantas que tienen un mayor grado de "seguridad intrínseca".

El Índice Mond se desarrolló a partir de la versión 1973 del Índice Dow y las comparaciones entre los dos que aquí se relacionan con esa versión. Desde entonces, ha habido una serie de novedades en el Índice Dow en sí misma, en particular, la introducción de los factores de control de pérdidas de crédito.

El método Mond implica hacer una evaluación inicial del riesgo de una manera similar a la utilizada en el Índice Dow, pero teniendo en cuenta las consideraciones de riesgo adicionales. El peligro potencial se expresa en términos del valor inicial de un conjunto de índices de incendio, explosión y toxicidad. Una revisión del factor de riesgo se realiza para ver si hay margen para reducir el peligro al hacer cambios en el diseño, y los valores intermedios de los índices se determinan. Se aplican factores de compensación de funciones de prevención y protección, y los valores finales de los índices o los índices de compensación, se calculan.

En resumen, el método de determinación del índice de Mond es como sigue. La planta se divide en unidades, la demarcación entre las unidades que se basa en la posibilidad de ubicar una barrera de separación (espacio abierto, pared o suelo) entre la unidad y sus vecinos.



El factor material se determinó como en el método de Dow, pero además, se introducen factores especiales de riesgo de material. De nuevo, como en el método de Dow, se hace uso de los factores de los gráficos y SPHs aunque los factores particulares son diferentes. Un factor de cantidad, basado en el inventario de los materiales, y los factores de riesgo de disposición también se introduce. También hay factores de riesgo de toxicidad.

Las características que deben tenerse en cuenta en el cálculo de los diferentes factores se especifican en detalle en el Manual Técnico, que contiene una gran cantidad de información práctica, en particular respecto de las características de compensación (Mannan, 2013).

2.3.3 Métodos cuantitativos

De acuerdo con Storch (2008), Son técnicas de análisis crítico que incluyen estructuras y cálculos para establecer la probabilidad de sucesos complejos (siniestro) a partir de los valores individuales de la probabilidad de fallos que corresponda a los elementos (equipo y humanos) implicados en los procesos.

2.3.3.1 Árboles de Fallas (FTA)

Nolan (2014) describe esta metodología, como una técnica deductiva que se centra en un incidente en particular, a menudo se llama un evento superior, y luego construye un diagrama lógico de todas las secuencias de eventos imaginables (tanto mecánicos y humanos) que podrían conducir a ese incidente. Por lo general, es un modelo lógico que retrata matemáticamente y gráficamente varias combinaciones de fallas de equipos, fracasos y errores humanos que podrían resultar en un incidente de interés, expresado en una estimación anual.

2.3.3.2 Árboles de eventos

Nolan (2014) refiere a la metodología como un modelo lógico que matemáticamente y gráficamente, retrata la combinación de los fracasos de los eventos y circunstancias en una secuencia de incidentes, expresada en una estimación anual.



2.3.3.3 Análisis cuantitativo de riesgos (QRA)

De acuerdo con el CCPS (2000), esta metodología, identifica escenarios de incidentes y evalúa el riesgo mediante la definición de la probabilidad de fallo, la probabilidad de diversas consecuencias y el impacto potencial de dichos efectos. El riesgo se define en el análisis de riesgo cuantitativo, como una función de la probabilidad o frecuencia y consecuencia de un escenario de accidente particular:

$$Riesgo = F(s, c, f)$$

s = escenario hipotético

c = consecuencia estimada

f = frecuencia estimada

2.3.4 Accidentes Mayores

Casal et al. (1999), describe al accidente como un suceso fortuito e incontrolado, capaz de producir daños. En general, en la industria química, este suceso coincide con situaciones de emisión, escape, vertido, incendio y explosión, donde están implicadas sustancias peligrosas. Si la situación generada se puede calificar como de riesgo grave, catástrofe o calamidad pública - inmediata o diferida- para las personas, el medio ambiente y los bienes, se la denomina “accidente mayor”.

2.3.4.1 Accidente Mayor

OGP (2010), define para la industria petrolera un accidente mayor como un accidente que resulte en al menos en uno de los siguientes:

- Múltiples fatalidades
- Para instalaciones costa fuera:



- Pérdida total o daño severo (definido posteriormente)
- Para instalaciones terrestres:
 - Daños a la propiedad por aproximadamente: 100M USD
- Derrame de 1000 barriles de petróleo

2.3.4.2 Pérdida total

Pérdida total de la unidad, incluyendo la pérdida total constructiva, desde el punto de vista del seguro, sin embargo, la unidad puede ser reparada y puesto en funcionamiento de nuevo (OGP, 2010).

2.3.4.3 Daño severo

El daño severo a uno de más módulos de la unidad; grandes daños a medio a estructuras portantes; grandes daños a equipos esenciales. (OGP, 2010)

2.3.5 Liberación de materiales peligrosos

Nolan (2014) describe al comportamiento de materiales peligrosos en la industria de proceso, al efectuarse la liberación estos pueden ser de forma gaseosa, nieblas o líquidos y o son liberaciones atmosféricas o de los contenidos presurizados de sistemas proceso.

Las liberaciones de Gas y niebla son consideradas más importantes ya que si son combustibles, que son fácilmente ignicibles, ya que están en el estado de gas y debido a la generación de nubes de vapor, que si se encienden, son inmediatamente destructiva en un carácter generalizado. Esto está en contraste con los incendios de líquidos que pueden ser menos propensos a la ignición, generalmente localizada, y relativamente controlable, la figura 4 muestra la secuencia de eventos potenciales de la liberación de materiales peligrosos a la atmósfera.

Liberación de materiales peligrosos

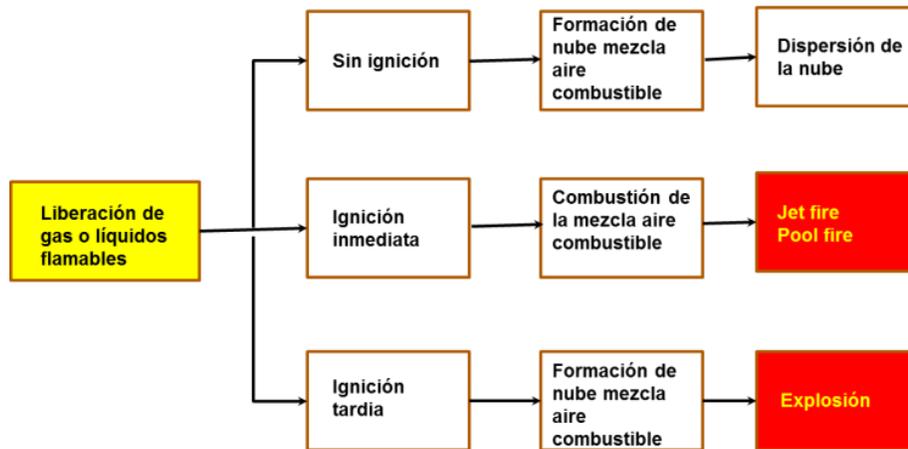


Figura 4 Secuencia de eventos potenciales en la liberación de materiales peligrosos.

Fuente: Sutton, I. (2015).

La causa de una liberación puede ser la corrosión externa o interna, erosión interna, el desgaste del equipo, defectos metalúrgicos, errores del operador, daños por terceros, o en algunos casos puede haber sido por las necesidades operacionales (Nolan, 2014)

Generalmente las aberturas de liberación físicas se pueden clasificar de la siguiente manera:

- **Falla catastrófica-** Un recipiente o tanque se abre por completo, la liberación inmediata de su contenido. La cantidad de liberación depende del tamaño del recipiente (por ejemplo, un tanque largo fractura de la costura soldada).
- **Ruptura Larga-** Una sección de tubería se retira dando lugar a dos fuentes de liberación de material. Cada sección, siendo una abertura cuya área de sección transversal son igual al área de la sección transversal de la tubería (por ejemplo, la tubería de impacto externo y una sección es removida).



- **Tubería abierta-** El extremo de un tubo está totalmente abierto, exponiendo el área de sección transversal de la tubería (por ejemplo, una perforación de soplado).
- **Ruptura-** Una fractura, ocurre en el costado de un tubo o manguera. El área de sección transversal de la abertura será típicamente aproximadamente igual al área de la sección transversal de la tubería o manguera (por ejemplo, una fractura de la soldadura de un tubo "agrietamiento inducido por hidrógeno").
- **Fuga-** las fugas son típicamente desarrolladas por fallas de los empaques de sellado de la válvula o de la bomba, corrosión localizada o efectos de erosión, y son típicamente de "pequeñas" hasta del tamaño de un "poro" (por ejemplo, por corrosión o erosión).
- **Venteos, Drenajes, tomas de instrumentos o fallas de puertos de muestro-** tuberías o válvulas de diámetro pequeño pueden abrirse o fallar, lo que libera vapores o líquidos en el medio ambiente de forma inesperada (por ejemplo, rotura de la mirilla de un indicador de nivel de vidrio).
- **Liberaciones por operación normal-** Almacenamiento de proceso o respiraderos de alcantarillado, accionamiento de válvulas de relevo, tanques de sellos, quemadores elevados y quemadores de fosa, que se consideran Liberaciones normales y aceptadas a la atmósfera.

2.3.5.1 Liberaciones gaseosas

De acuerdo con Nolan (2014), hay un número de factores que determinan la velocidad de liberación y la geometría inicial de una liberación de gas de hidrocarburo. La más importante es, si el gas está bajo presión o liberado en las condiciones atmosféricas. Dependiendo de la fuente de liberación del escape de gas puede durar desde varios minutos, horas o días, hasta que el suministro es aislado, agotado, o totalmente despresurizado, y encamina para su eliminación segura. Las fuentes comunes de larga duración son depósitos subterráneos (por ejemplo, rupturas), tuberías largas sin capacidades de aislamiento intermedias, recipientes de gran volumen



de proceso, y los sistemas de proceso que contienen grandes inventarios sin capacidades de aislamiento segmentados.

Según Nolan (2014), si se libera en condiciones atmosféricas, el gas, tendera ya sea a subir o bajar en función de su densidad de vapor y será transportado por acción de los vientos dominantes (si existe en el momento). La densidad de vapor más común de petróleo y materiales químicos es mayor que 1 y por lo tanto no se elevara ni disipara fácilmente. En ausencia de viento, los gases más pesados se acumulan en los puntos bajos en el terreno o no se disiparán de zonas congestionadas. Estas liberaciones atmosféricas, si se encienden, se quema relativamente cerca del punto de origen, normalmente en una posición vertical con llamas de corta longitud. Para los gases más ligeros, la altura de una columna de gas en su mayoría estará limitada por las condiciones atmosféricas, tales como la velocidad del viento ambiente. Si se encienden los gases, la altura de la columna de humo se elevará debido a la mayor flotabilidad de los gases de alta temperatura del proceso de combustión.

Para las liberaciones de gas a presión, hay una serie de factores determinantes, que influyen en las tasas de liberación y la geometría inicial de los gases de escape. El gas presurizado se libera como un chorro de gas y dependiendo de la naturaleza de la falla, puede ser dirigido en cualquier dirección. Para los sistemas de tuberías, la liberación es generalmente perpendicular a la tubería. Todo o parte del gas puede ser desviado por las estructuras circundantes o equipos.

Si la capacidad de aislamiento adecuado está disponible y empleado en el momento oportuno, la liberación inicial se caracteriza por alto flujo y el impulso que disminuye a medida que se aplica el aislamiento o suministros se agotan. Dentro de unos pocos diámetros de tubería desde el punto de liberación, el gas liberado, la presión disminuye. Gases que se escapan son normalmente muy turbulentos y el aire será inmediatamente arrastrado a la mezcla. La mezcla de aire también reducirá la velocidad del chorro de gas que se escapa. Obstáculos como plataformas aéreas, bastidores de tuberías, estructuras, etc., Interrumpirán las fuerzas de impulso de cualquier comunicado de presión.



Estas liberaciones si no son encendidas tendera generalmente a formar una nube de vapor que podría dispersarse de forma natural en la atmósfera o si posteriormente ser encendida, causaran una explosión si la nube se encuentra en un área relativamente confinada. Cuando los procesos de dispersión turbulentos son frecuentes (por ejemplo, el flujo de alta presión, los vientos, la congestión, etc.) el gas se extienda en ambas dimensiones horizontal y vertical mientras continuamente se mezcla con el oxígeno disponible en el aire. Inicialmente, los gases que escapan están por encima del UEL, pero con la dispersión y efectos de turbulencia, pasarán rápidamente en los límites inflamables. Si no se enciende y dando una adecuada distancia para dilución en el medio ambiente, con el tiempo se dispersare por debajo del LEL. Varios software están disponibles en la actualidad que puede calcular la dispersión turbulenta gaseosa jet, atmósferas explosivas en ubicaciones corriente abajo, y los volúmenes para cualquier producto inflamables dado, las tasas de liberación e ingreso de datos atmosférica (es decir, la dirección y velocidad del viento) (Nolan, 2014).

2.3.5.2 Liberaciones en forma de niebla o aerosol

Señala Nolan (2014), las liberaciones en forma de aerosol o neblina, generalmente se comportan como un gas o la liberación de vapor. El combustible es altamente atomizado y se mezcla con el aire. Los aerosoles o nieblas pueden inflamarse fácilmente, incluso por debajo de su temperatura de punto de inflamación del material involucrado desde la mezcla de las pequeñas partículas de combustible con el aire que está presente.

2.3.5.3 Liberaciones de líquidos

Liberaciones líquidos se caracterizan por estar contenida, permitir la esorrentía, o extenderse a una elevación de la superficie inferior. Si son altamente volátiles, la disipación por vaporización puede producirse cuando la tasa de vaporización es igual a la velocidad de propagación. Dependiendo de la viscosidad de los líquidos no volátiles, tenderán a esparcirse



inmediatamente y formar en un "charco" (pool) de líquido que es localizado en el área inmediata. Cuanto mayor sea la viscosidad, mayor tiempo tardará en esparcirse (Nolan, 2014).

Como una estimación general, 3,81litros (1 galón) de un líquido confinado en una superficie plana cubrirá aproximadamente 1.8 metros cuadrados (20 pie²), independientemente de la viscosidad. Una charco sobre agua tranquila se extenderá bajo la influencia de la gravedad hasta ser limitada por la tensión superficial, por lo general dando una marea negra de espesor mínimo de 10 mm (0,04 pulg.) sobre el agua. Un charco sobre el agua también irá a la deriva en la dirección del viento y la corriente. Si no se produce la ignición, los extremos más ligeros se evaporan y, finalmente, el aceite residual se divide por la acción de las olas y la digestión bacteriológica. Durante la evaporación de las fracciones más ligeras, vapores combustibles se pueden formar inmediatamente sobre el derrame de petróleo para una distancia corta (Nolan, 2014).

Los líquidos bajo presión (fugas de tuberías, fallas del sello de la bomba, ruptura de recipientes, etc.) serán arrojados a cierta distancia del punto de origen, mientras que las fugas atmosféricas se emitirán en el punto de la liberación. La otra característica de las liberaciones de líquidos es su punto de flash. Líquidos de punto alto, no contenidos por encima de sus temperaturas de punto de flash, son intrínsecamente más seguros que los líquidos de bajo punto de flash. La mayoría de los incendios de líquidos son relativamente fáciles de contener y suprimir, mientras que los fuegos de gas son propensos a las posibilidades de explosión si se extinguen y los puntos de origen no son aislados (Nolan, 2014).

Liberaciones líquidos se caracterizan por los siguientes rasgos:

- **Las fugas y Goteos-** las fugas y goteos, se caracterizan por liberaciones en diámetros pequeños de las altas frecuencias. Por lo general son causados por corrosión y erosión, fallas de tuberías, fallas mecánicas y de mantenimiento de juntas y válvulas.



- **Corrientes-** Liberaciones de mediano tamaño a moderadas, de bajas frecuencias. Por lo general pequeñas aberturas de diámetro en tuberías que no han sido cerrados de manera adecuada, por ejemplo, tomas de muestra o líneas de dren.
- **Aerosoles o nieblas-** Liberaciones de tamaño Medio, de frecuencias moderadas que se mezclan inmediatamente en el aire después de la liberación. Normalmente junta de tubería, sello de la bomba y de vástago de válvula, falla de empaques bajo alta presión. En ocasiones se presentan liberaciones de quemadores elevados
- **Rupturas-** Liberaciones grandes, de frecuencias muy bajas. Normalmente recipientes, tanques, tuberías o mangueras, por fallas internas, externas o por terceros y las condiciones del fuego (es decir, condiciones BLEVE).
- **Operaciones involuntarias de liberación-** Acciones por error humano, por los operadores que se producen con baja frecuencia. Liberaciones inusuales que ocurren típicamente durante las actividades no rutinarias.

2.4 Escenarios accidentales

Casal (1999), agrupa los escenarios accidentales dependiendo del tipo de fenómeno peligroso principal que lo caracterice, agrupándolos de la manera siguiente:

- Escenarios que determinan fenómenos peligrosos de tipo térmico:
 - *Incendio de charco (pool fire)*. Combustión estacionaria con llama de difusión del líquido de un charco de dimensiones conocidas (extensión), que se produce en un recinto descubierto.
 - *Dardo de fuego (jet fire)*. Llama estacionaria y alargada (de gran longitud y poca amplitud) provocada por la ignición de un chorro turbulento de gases o vapores combustibles. Un ejemplo típico es el soplete.



• *Llamarada (flash fire)*. Llama progresiva de difusión, de baja velocidad. No produce ondas de presión significativas. Suele estar asociada a la dispersión de vapores inflamables a ras de suelo. Cuando éstos encuentran un punto de ignición, el frente de la llama generado se propaga hasta el punto de emisión, barriendo y quemando toda la zona ocupada por los vapores en condiciones de inflamabilidad. Si el origen de los vapores es un vertido con evaporación, el fenómeno acaba en un incendio de charco.

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

➤ Escenarios que determinan fenómenos peligrosos de tipo mecánico:

• *Explosión (en general, sin especificar)*. Equilibrio en un breve período de tiempo de una masa de gases en expansión contra la atmósfera que la envuelve. Si la energía necesaria para la expansión de los gases procede de una reacción química, se dice que la explosión es química; es el caso de las explosiones derivadas de fenómenos de combustión donde están involucrados gases inflamables, de explosiones derivadas de reacciones incontroladas y de explosiones asociadas a la ignición o descomposición de sustancias explosivas. Si la energía procede de la liberación repentina de un gas comprimido o de la expansión rápida de vapores, se trata de una explosión física (este último tipo de explosión se denomina estallido).

• *Explosión de una nube de vapor inflamable no confinada (UVCE, acrónimo de la expresión inglesa Unconfined Vapor Cloud Explosion)*. Tipo de explosión química que involucra una cantidad importante de gas o vapor en condiciones de inflamabilidad, que se dispersa por el ambiente exterior. Para que esto ocurra, a grandes rasgos, la cantidad de gas tiene que superar el



valor de algunas toneladas. Cuando no es así, normalmente la ignición de la masa de vapor deriva en una llamarada sin efectos mecánicos importantes. En general, este tipo de accidentes se asocia a situaciones que determinan el escape masivo de gases licuados, gases refrigerados y líquidos inflamables muy volátiles (con una intensa evaporación), ya que en estas circunstancias se pueden generar una gran cantidad de vapores inflamables en un breve período de tiempo.

- *Explosión de vapor confinado (CVE, acrónimo de la expresión Confined Vapor Explosion).* Tipo de explosión química que involucra gases inflamables en condiciones de confinamiento (total o parcial). Normalmente se asocia a explosiones derivadas de la combustión en recintos cerrados de vapor inflamable (naves industriales, salas de trascolamiento, cámaras de aire de depósitos, sistemas de drenaje contaminados por productos volátiles, etc.).
- *Estallido de contenedor a presión.* Explosión física derivada de la rotura repentina de un recipiente a presión, causada por la presión interior y por un fallo de la resistencia mecánica del contenedor, que provoca una dispersión violenta del fluido interior, una onda de presión y proyectiles.
- *BLEVE.* Fenómeno de estallido normalmente asociado a la situación accidental descrita antes con el apelativo añadido de bola de fuego. Puede suceder también con sustancias licuadas a presión y no inflamables cuando, en determinadas situaciones de presión y temperatura, el recipiente que las contiene se rompe repentinamente (un capítulo de este libro se dedica específicamente a este tema). Cuando está asociado al fenómeno de bola de fuego, el alcance de la magnitud física peligrosa que caracteriza el efecto mecánico (sobrepresión) suele ser inferior al alcance de la magnitud peligrosa de naturaleza térmica (radiación); de ahí que la planificación de emergencias sólo se realice teniendo en cuenta los daños de este último fenómeno.

2.4.1 Incendios

Assael, M, J., Kakosimos, K, E. (2010), define al fuego como una reacción de oxidación exotérmica que ocurre en la fase de gas, que resulta de la mezcla de gases inflamables con aire u



otros medios oxidantes. Si la concentración de la sustancia inflamable alcanza su masa crítica para la ignición, y una fuente de ignición adecuada capaz de suministrar la potencia requerida está presente, entonces habrá un fuego.

Los incendios y las explosiones son las causas más importantes y más comunes de daños a los equipos y de las lesiones y muertes en la industria. Esto es especialmente cierto en la perforación de petróleo en alta mar, donde hay una alta concentración de equipos en espacios muy estrechos.

Los daños son una consecuencia directa del flujo de calor generado. Para una primera aproximación para el cálculo del flujo de calor, Q' (W / m²), en la superficie de la llama, la ecuación de Stefan-Boltzmann se puede emplear:

$$q' = \varepsilon \sigma (T_f^4 - T_a^4)$$

Donde ε denota la emisividad cuerpo-gris (-) y σ la constante de Stefan-Boltzmann ($=5.6703 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$). Las temperaturas, T_f y T_a (K), se refieren a la temperatura en la superficie de la llama y la temperatura ambiente, respectivamente. De hecho, sin embargo, esta ecuación no puede ser empleada, ya que la temperatura difiere todo sobre la llama y por lo tanto no es una temperatura única que puede ser determinado. Además, la llama no irradia de toda su superficie, ya que una parte de ella está cubierta por el hollín, y una gran parte del flujo de calor es absorbida por el dióxido de carbono y la humedad en la atmósfera. Como consecuencia de estos, el flujo de calor calculado por la ecuación de Stefan-Boltzmann es significativamente mayor que el flujo de calor real (Assael, 2010).

En un esfuerzo para estimar el flujo de calor, y sus efectos, muchos modelos aparecen en la literatura (Assael, 2010). Los grupos más importantes de tales modelos son los siguientes:



a) Modelo Fuente- Punto

Los modelos de fuentes puntuales no tienen en cuenta la forma de la llama, pero asumen que el calor de flujo se origina a partir de una fuente puntual. El flujo de calor, Q' (W / m^2), en una distancia, X (m), desde el centro del fuego, se puede expresar como:

$$q' = \frac{1}{4\pi X^2} \eta m_k \Delta H_c$$

Donde, m_k (kg / s) indica la velocidad de combustión con el que se quema el material inflamable, ΔH_c (J/kg) el calor de combustión, y η la eficiencia de la combustión. Mientras que la relación anterior tiene la ventaja de la simplicidad, la analogía del flujo de calor con el cuadrado de la distancia no se ha observado experimentalmente (Assael, 2010).

Estos modelos generalmente sobreestiman el flujo de calor, pero producen buenos resultados en una distancia de unos 10 radios desde el centro del fuego.

b) Modelos Flama solida

Los modelos sólidos de llama asumen que la llama es de una forma sólida que irradia calor sólo de su superficie. Modelos toman en consideración la forma de la llama y calcular el flujo de calor en función de la superficie emisora de energía, el factor de forma y la transmisividad atmosférica. (Assael, 2010).

Estos modelos son sencillos en su aplicación, fácil de programar y producir resultados relativamente buenos.



c) Modelos de campo

Los modelos de campo, o modelos computacionales de dinámica de fluidos (CFD), se basan en la solución numérica de las ecuaciones diferenciales parciales de Navier-Stokes.

Estos modelos requieren validación cuidadosa con los datos reales o experimentales. Su principal desventaja es las grandes necesidades en tiempo de cálculo, la dificultad en la programación y la inflexibilidad en la compatibilidad con muchas aplicaciones (Assael, 2010).

d) Modelos Integrales

Los modelos integrales constituyen un compromiso entre los modelos semi-empíricos y los modelos CFD. Ellos se basan en la solución de ecuaciones diferenciales para la conservación de la masa, cantidad de movimiento y energía, pero su enfoque matemático es más simplificado y se refiere al caso concreto a examinar. De esta manera, se consigue una reducción significativa en el tiempo de computación (Assael, 2010).

e) Modelos de zona

Según los modelos de la zona, el espacio se divide en zonas de espacio homogéneo de enfoque unificado, que están conectados a través de ecuaciones empíricas y balances de masa y energía (Assael, 2010).

Estos modelos se emplean en áreas estructurales, pero no en espacios abiertos.

De los métodos antes mencionados, los modelos sólidos de llama son los más ampliamente utilizados en la actualidad, ya que pueden, con cuidado, fácilmente aplicarse en la mayoría de los casos. Además, los modelos integrales son cada vez más en uso en la industria, ya que tienen en cuenta la geometría exacta de la unidad (Assael, 2010).



Como se ha indicado, en el modelo de " Flama-sólida" la llama se trata como un objeto sólido que se irradia calor de su superficie visible. De acuerdo con este modelo, el flujo de calor q' (W / m^2), en una cierta distancia, se expresa como:

$$q' = SEP_{act} F_{view} \tau_{\alpha}$$

Donde, SEP_{act} (W / m^2) denota el poder superficie de emisión real, F_{view} (-), el factor de vista, y τ_{α} (-) la transmisividad atmosférica. En la relación anterior, la superficie de emisión de potencia se calcula empíricamente como una función de la velocidad de combustión y tiene en cuenta la fracción de la llama cubierta por el hollín, mientras que el factor de vista depende de la forma de la llama, la presencia de viento y el distancia del receptor de la superficie externa de la llama. Por último, la transmisividad atmosférica tiene en cuenta la parte del flujo de calor absorbido por el aire que se encuentra entre la llama y el receptor de la radiación (Assael, 2010).

Este enfoque se adoptará para el cálculo del flujo de calor para muchos tipos de incendios. Una vez que se calcula el flujo de calor, se examinan los efectos siguientes:

- ❖ En los seres humanos (número probable de víctimas fatales a causa de incendios, así como el número probable de lesiones con primero y segundo grado quemaduras).
- ❖ En materiales (primero y segundo grado daños).

Se han desarrollado cuatro modelos diferentes de fuegos: el fuego de la piscina, bola de fuego, el fuego y el fuego jet flash. Dependiendo del flujo de salida, los siguientes casos se pueden distinguir:

- ❖ Si el flujo de salida está en el estado líquido, a continuación, una piscina de sustancia inflamable es formada, probablemente seguida de un incendio piscina.
- ❖ Si la salida es un gas inflamable de alta presión y se enciende inmediatamente, se forma un chorro de fuego. Si la salida es muy repentina, el resultado puede ser un incendio repentino.



- ❖ Si la salida es un gas inflamable de baja presión y que no se enciende inmediatamente, a continuación, se puede crear una nube de gases inflamables.

2.4.1.1 Efectos en materiales

Assael (2010) describe que el daño a materiales por el flujo de calor será separado en dos categorías de acuerdo con los efectos observados:

- Daños de 1er grado: total destrucción o falla completa del material
- Daños de 2ndo grado: superficial, deterioro visual de materiales.

El criterio para estos daños es la temperatura de superficie del material examinado. Cuando esta temperatura de superficie excede una temperatura crítica, T_{crit} (K), entonces los daños de 1er y 2ndo grado serán observados. En la tabla 6, se muestran los valores de las temperaturas críticas para varios materiales (Assael, 2010).

Tabla 6 Valores de las temperaturas críticas.

	Daños 1er grado		Daños 2ndo grado	
	q'_{crit} (kW/m ²)	T_{crit} (K)	q'_{crit} (kW/m ²)	T_{crit} (K)
Acero inoxidable		1400		480
Hierro	150 - 200	770	20 - 80	470
Madera	15	680	2	370
Aluminio		520	---	---
Vidrio	4	390	---	---
Materiales sintéticos	15		2	370

En la misma tabla, valores típicos de flujos de calor críticos, q'_{crit} (kW/m²), son también proporcionados. El flujo de calor crítico representa el mínimo flujo de calor requerido ya que la superficie del material llega a alcanzar su temperatura crítica. Este puede ser observado que



excepto en el caso del acero, donde (a causa de su alta difusión térmica) el calor se difunde rápidamente en su interior, los valores del flujo de calor crítico de otros materiales son relativamente bajos. Materiales sintéticos pueden ser poliéster reforzado, PCV, Perspex, etc. (Assael, 2010).

2.4.2 Efectos de calor radiante

Assael (2010) describe el mecanismo de lesión que afectan a las personas, por consecuencia de un incendio, estas son debidas primeramente a la gran cantidad calor radiante generado por la combustión de substancias inflamables, y secundariamente debido a los gases tóxicos producidos por la combustión.

Entre los gases CO₂, NO_x, SO_x, usualmente producidos durante la combustión, son también producidos gases de alta toxicidad, muy perjudiciales a las personas cuando son inhalados. Por otra parte, la generación de gases tóxicos puede entorpecer los esfuerzos de las personas tratando de huir del incendio, así como los esfuerzos del personal de rescate y bomberos en proporcionar auxilio, y por lo tanto incrementan las lesiones y muertes.

El procedimiento de cálculo de efectos a las personas, depende de la relación del flujo de calor con respecto a la distancia, y el uso de la dosis de radiación y la función probit. De estas magnitudes la probabilidad de lesión (quemaduras de 1er y 2do, grado) o muerte, será calculado. La integración espacial de las relaciones antes mencionadas, estimará el número total de quemaduras de 1er y 2do grado o muertes, las cuales resultan de un particular flujo de calor de un incendio.

Se enfatiza, que no obstante, los resultados de este procedimiento de cálculo no son totalmente cuantitativos o vinculantes. Usualmente su propósito es, primeramente para estimar los efectos y consecuencias de un evento, para que planes de contingencia de escenarios hipotéticos sean desarrollados, discutidos y establecidos (Assael, 2010).

2.4.2.1 Quemaduras en Piel Humana

Assael (2010) en la Figura 5, describe los efectos en humanos son directamente relacionados a la intensidad del flujo de calor y la duración de exposición de las personas a este.

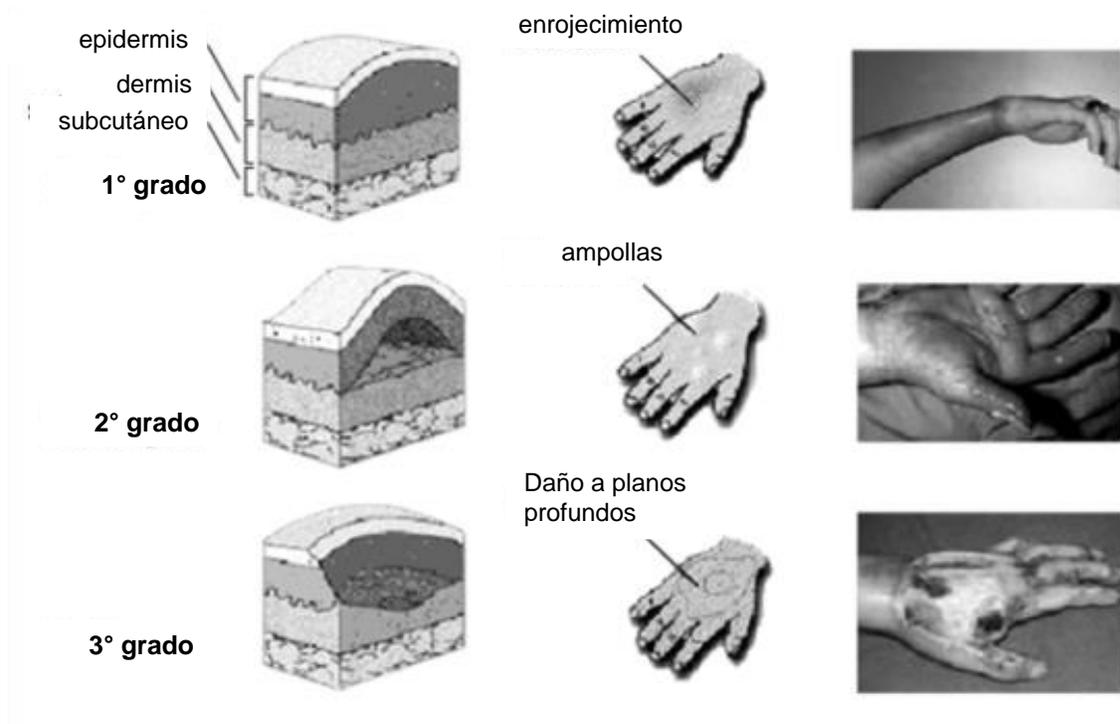


Figura 5 Tipos de quemaduras.

Fuente: <http://www.bunrsurvivor.com/>

El calor radiante de un incendio tiene un doble efecto sobre las personas. Inicialmente, hay un incremento en el ritmo cardiaco, sudoración y elevación de la temperatura corporal. El segundo y más importante efecto es que refiere a quemaduras causadas por la transferencia de calor a la piel. Tres tipos de quemaduras son distinguidas:

1er grado: Quemaduras de 1er grado, afecta únicamente la epidermis u otras capas de piel. El área de quemadura es roja, dolorosa, seca, y no presenta ampollas. Una leve quemadura por sol es un ejemplo. Tejidos dañados por exposición prolongada son raros y usualmente consiste de una alteración del color de la piel.



2do grado: Quemaduras de segundo grado involucra la epidermis y parte de la capa de dermis de la piel (0.07 – 1.012 mm de profundidad). El área de quemadura presenta enrojecimiento, ampollas y puede estar inflamada y dolorosa.

3er grado: Quemaduras de tercer grado destruye la epidermis y dermis. Estas quemaduras pueden también dañar huesos, músculos, y tendones. El área de quemadura es blanca o carbonizada. No hay sensación en esta área debido a la destrucción de terminales nerviosas.

Cabe mencionar que las quemaduras de 2do y 3er grado pueden dar lugar discapacidades permanentes. Su tratamiento a menudo requiere atención clínica en un hospital especializado.

Una probabilidad realista de mortalidad es también presente dependiendo de la cantidad de superficie de piel que la quemadura cubra. Esto es típicamente destacado que para una quemadura que abarca más del 50% de la piel, un niño de 0-9 años de edad tendrá un 80% de probabilidad de sobrevivir, un adulto de 30 a 35 años de edad tiene un 50% de probabilidad de sobrevivir, mientras que personas de más de 60 años de edad, podrían no tener probabilidades de sobrevivir. En la tabla 7, se muestran los valores promedio para algunas propiedades físicas de la piel. (TNO, 1989):

Tabla 7 Valores promedio de propiedades de la piel de un hombre de 70 kg y 1.7m

peso	4	kg
superficie	1.8	m ²
contenido de agua	70-75	%(masa)
densidad	110	Kg/m ³
espesor	0.05-5	mm
conductividad térmica	0.65	W/m ^{°k}
capacidad de calor específico	35	Kj/kg ^{°k}



Finalmente, se menciona que las quemaduras de piel son directamente relacionadas a la ropa que cubre la piel. Siempre la ropa no prenda, esta protegerá la piel. Usualmente, no obstante, debido al calor radiante, la ropa se encenderá y por lo tanto causara peores quemaduras (Assael, 2010).

2.4.2.2 Límites de intensidad de radiación térmica.

En el orden de ser capaz de calcular y consecuentemente evitar los efectos de los flujos de calor, típicamente los límites de radiación térmica, han sido propuestos. En la tabla 8, los límites de intensidad de radiación térmica propuestos por el Banco Mundial (World Bank 19988) son mostrados.

Estos límites son directamente relacionados a específicos efectos por radiación sobre personas y materiales, y son en completo acuerdo con aquellos propuestos por el Instituto americano del Petróleo (API).

La intensidad de la radiación solar es aproximadamente 0.8 a 1 kW/m^2 . Cuando se calculan las distancias que corresponden a un específico límite de intensidad de radiación térmica, la intensidad de la radiación solar también debe ser adicionada. Por ejemplo, si se calcula a partir de los modelos matemáticos para un flujo de calor a 100 m desde la superficie de flama es 2 Kw/m^2 , el flujo de calor real para las personas está sujeto en esta distancia (tomando en consideración la radiación solar) es aproximadamente 2.8 a 3 kW/m^2 (Assael, 2010).

El valor para la radiación solar usualmente empleada en cálculo de efectos sobre personas es igual a 1 kW/m^2 .



Tabla 8 Límites de intensidad de radiación térmica

Flujo de calor kW/m ²	Efectos en materiales	Efectos en personas
37.5	Daño a equipos	100% de letalidad en 1min. 1% de letalidad en 10s.
25	Mínima intensidad para ignición de madera en exposición prolongada	100% letalidad en 1min. Serias lesiones en 10s.
12.5	Mínima intensidad para ignición, y fundición de tubería plástica.	1% de letalidad en 1min. Quemaduras 1er grado en 10s.
4	Sin efectos	No hay letalidad Probables quemaduras de 2ndo grado Dolor después de 20s. de exposición
1.6	Sin efectos	Límite aceptado para exposición prolongada.

2.4.2.3 Dosis radiación térmica

Quemaduras o muerte son consecuencia directa de la intensidad del flujo de calor radiante desde la flama y el tiempo de exposición. Para determinar el número de quemaduras y muertes, el término “Dosis de radiación térmica,” D ($W^{4/3}s*m^{-8/3}$), es empleada, como este incluye ambos términos antes mencionado siendo definidos de la siguiente ecuación como:

$$D = t_{eff} (q')^{4/3} \quad \text{Ec (1)}$$

En esta ecuación, q' (W/m^2) es el flujo de calor calculado para varios tipos de incendio. El tiempo, t_{eff} (s), representa el tiempo de exposición de las personas a este flujo de calor.

El tiempo de exposición de una persona a un incendio depende de varios factores:

- 1) El tipo de incendio.
- 2) La posición de la persona en relación a el incendio, y
- 3) El tiempo que este tome para reaccionar y como el individuo reaccione y cuando este se dé cuenta del evento, así también, parámetros tales como su edad y condición física.



El tiempo de exposición de una persona en el caso de un incendio tipo bola de fuego o un flamazo es realmente igual a la duración del incendio (<1min). En caso de incendios tipo charco e incendios tipo jet, la duración del incendio es mayor y el tiempo de exposición de la persona a el flujo de calor radiante depende del tiempo que la persona tome para reaccionar y escapar (Assael, 2010).

Por lo tanto el tiempo de exposición de la persona es directamente relacionado al tiempo de escape del evento. El tiempo de escape incluye el tiempo de la reacción inicial así como el tiempo requerido por la persona para cruzar la distancia para que alcance áreas protegidas del flujo de calor radiante, o áreas donde el nivel de flujo de calor es suficientemente bajo para prolongar su exposición (Assael, 2010).

El tiempo de reacción depende directamente del espacio donde el incendio inicio así como las características de la población expuesta a este. Por ejemplo, uno podría esperar diferentes tiempos de reacción entre personas encarando un incendio en una refinería, y personas que por casualidad están presentes en un incendio por un accidente de un auto tanque, en un área deshabitada. En el primer caso los tiempos de reacción son esperados a ser muy bajos, debido al el entrenamiento de las personal, su edad y su conciencia de que tal evento puede pasar. En el segundo caso, el tiempo de reacción esperado es mucho mayor, como las personas expuestas a tal evento pueden ser mucho mayores, de un grupo sensible, y ciertamente no entrenada o no tener experiencias similares (Assael, 2010).

El término “grupo sensible” puede ser empleado para grupos de personas quienes no se espera reaccionen inmediatamente o efectivamente durante una evacuación causada por la presentación de tal emergencia, por ejemplo los ancianos, discapacitados o niños. Los tiempos de reacción en caso de incendios, así como velocidades de escape propuestas por varios investigadores, son mostrados en la tabla 9.



Tabla 9 Tiempos de reacción y velocidades de escape

Investigadores	Tipo de población	Velocidad de escape (m/s)	Tiempo de reacción (s)	Dosis $10^4 \times (W^{4/3} s^* m^{-8/3})$ para la probabilidad de	
				Muerte 1%	Lesiones 50%
Eisenberg <i>et al.</i> 1975	---	---	---	960	2380
Tsao y Perry 1979	---	---	---	420	1050
H.S.E 1981	promedio	2.5	0	100	---
	sensible	1	5	500	---
Hynes 1983	---	6	---	---	---
TNO 1989	promedio	4	5	520	---
	sensible	---	---	430	1090

En relación a la tabla 9, algunos puntos son valores mencionados. El record mundial para correr 100 m, es aproximadamente 9.8 s, y este corresponde a la velocidad de aproximadamente 10 m/s, entonces los valores para las velocidades de escape, acotado en la tabla, así también el tiempo de reacción de 5s, son lógicos (Assael, 2010).

El tiempo de exposición, t_{eff} (s), que entra en la definición de la dosis de radiación térmica, ecuación (1), es usualmente tomada como igual a la suma de un tiempo de reacción inicial más el tiempo requerido para alcanzar el punto seguros, que es:

$$t_{eff} = t_r + \frac{(x_0 - r)}{u} \quad Ec (2)$$

En la expresión anterior, t_r (s) es el tiempo de reacción de la persona (=5 s), x_0 (m) es la distancia entre la superficie de flama y la posición donde la intensidad del flujo de calor es menor a 1 kW/m^2 (limite bajo de intensidad de radiación térmica), r (m), la distancia de la persona desde la superficie de la flama, y u (m/s) la velocidad de escape-usualmente igual a 4m/s.



Si el tiempo de exposición calculado por la ec (2), es mayor que la duración real del incendio (por ejemplo en el caso de incendios tipo bola de fuego), entonces el tiempo de exposición es tomado igual a la duración del incendio (Assael, 2010).

2.4.2.4 Probabilidad de lesión o muerte

De acuerdo con Assael (2010), en orden para estimar los efectos de incendios, las curvas de dosis respuesta son usualmente empleadas para correlacionar la magnitud de la consecuencia a las personas con la específica dosis relacionada. La relación dosis-respuesta ha sido creada de datos experimentales o de campo para varios parámetros como son radiación térmica, sobrepresión, calor, ruido, concentración de gases tóxicos, etc. Existen muchos métodos para la reproducción de las curvas dosis-respuesta, pero el método más ampliamente usado actualmente (porque de su facilidad de cálculo mediante computadora) es el método de funciones probit.

Para el cálculo de la probabilidad, P (-), de lesión (quemaduras de 1er o 2do grado) o muerte, como consecuencia de una dosis específica, D ($W^{4/3}s*m^{-8/3}$), la siguiente ecuación es empleada

$$P = F_k \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{Pr - 5}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad \text{Ec (3)}$$

Donde la función probit, Pr (-), es dada por la expresión empírica,

$$Pr = c_1 + c_2 \ln D \quad \text{Ec (4)}$$

En las dos ecuaciones anteriores, la probabilidad, P (-), refiere a lesiones (quemaduras de 1er o 2do grado) o muerte, dependiendo de los valores de los coeficientes c_1 y c_2 que son



seleccionados de la tabla 10. Valores para el error de función, pueden ser fácilmente encontrados en la literatura:

$$\text{erf}(-z) = -\text{erf}(z). \text{ para } z > 0 \text{ y error} < 5 \times 10^{-4} \text{ (Abramowitz and Stegun 1970).}$$

$$\text{Erf}(z) = 1 - (1 + 0.278393 z + 0.230389 z^2 + 0.000972 z^3 + 0.078108 z^4)^{-4}.$$

El parámetro, $F_k (-)$, refiere a la influencia de la ropa en la probabilidad de lesión o muerte, y esta constituye un factor de corrección, siempre que la ropa no se prenda. Estos valores están en el rango de 0.14 para ropas de invierno (área grande de cobertura de piel) a 0.95 para ropa de verano (área pequeña de cobertura de piel). (Assael, 2010).

Consecuentemente, para un particular flujo de calor en una específica distancia, el tiempo de exposición t_{eff} (s) es calculado por la ecuación (2) y la dosis de radiación térmica es determinada por la ecuación (1). Obteniendo la dosis de radiación térmica, la correspondiente función probit, Pr , es obtenido de la ecuación (4), para lesión o muerte y de esta la correspondiente probabilidad, P de la ecuación (3)

Tabla 10 Coeficientes c_1 y c_2

(TNO 1989)		
Efecto	c_1	c_2
Quemadura 1er grado	-39.89	3.0186
Quemadura 2ndo grado	-43.14	3.0186
muertes	-36.38	2.56

Basado en los valores de los coeficientes c_1 y c_2 dados en la tabla 10, en la tabla 11 los valores calculados de las funciones probit y probabilidades para lesión (quemaduras de 1er o



2do grado) o muerte para específicas dosis de radiación térmica son dadas. El factor de corrección, $F_k (-)$, que refiere a la ropa, ha sido tomado igual a la unidad, por ejemplo que la ropa no tiene efecto.

Como un ejemplo, vemos que para una dosis de radiación $D=9,000,000 \text{ W}^{4/3}\text{s}^*\text{m}^{-8/3}$, la probabilidad de quemadura de 1er grado es 100%, para quemadura de 2do grado es de 57.8% y para muerte es de 34.9%. Es más, el porcentaje referido a la probabilidad de muerte, incluye los porcentajes de quemaduras de 1er y 2do grado (que es, aquellas personas que murieron por el calor radiante ya teniendo quemaduras de 1er y 2do grado). Proporcionalmente, en el porcentaje de personas con quemadura de 2do grado, personas con quemaduras de 1er grado son incluidas (Assael, 2010).

Tabla 11 Probabilidades para dosis específica.

D ($\text{W}^{4/3}\text{s}^*\text{m}^{-8/3}$)	1er grado		2do grado		Letalidad	
	Pr (-)	P (%)	Pr (-)	P (%)	Pr (-)	P (%)
1×10^6	1.87	0.1				
2×10^6	3.97	15.1	0.66	0.0	0.76	0.0
3×10^6	5.19	57.5	1.88	0.1	1.80	0.1
4×10^6	6.06	85.5	2.75	1.2	2.54	0.7
5×10^6	6.73	95.9	3.42	5.7	3.11	2.9
6×10^6	7.28	98.9	3.97	15.2	3.57	7.7
7×10^6	7.75	99.7	4.44	28.7	3.97	15.2
8×10^6	8.15	99.9	4.84	43.7	4.31	24.5
9×10^6	8.51	100.0	5.20	57.8	4.61	34.9
10×10^6	8.82	100.0	5.51	69.7	4.88	45.3
D ($\text{W}^{4/3}\text{s}^*\text{m}^{-8/3}$)	Pr (-)	P (%)	Pr (-)	P (%)	Pr (-)	P (%)



D ($W^{4/3}s^*m^{-8/3}$)	1er grado		2ndo grado		Letalidad	
	Pr (-)	P (%)	Pr (-)	P (%)	Pr (-)	P (%)
12×10^6	9.37	100.0	6.06	85.6	5.35	63.7
14×10^6	9.84	100.0	6.53	93.7	5.74	77.1
16×10^6	10.24	100.0	6.93	97.4	6.09	86.1
18×10^6	10.60	100.0	7.29	98.9	6.39	91.7
20×10^6	10.92	100.0	7.61	99.5	6.66	95.1
30×10^6	12.14	100.0	8.83	100.0	7.69	99.6
40×10^6	13.01	100.0	9.70	100.0	8.43	100.0

Nota: Los Valores en la tabla son obtenidos con $F_k = 1$

2.4.2.5 Efectos Totales

En los apartados anteriores se mostró como la probabilidad, $P(-)$, para lesión (quemaduras de 1er o 2ndo grado) o muerte, puede ser calculada por un flujo de calor a una distancia específica. Para calcular los efectos totales, las expresiones previas deben ser integradas sobre el área total alrededor del incendio. Si uno asume una densidad de población de N_0 (personas/m²) en la cercanía, y el incendio tiene un radio R (m), entonces el número total de personas agonizantes será igual a:

$$N = \left(N_0 \pi R^2 \right) + \int_R^{\infty} P N_0 2\pi r dr$$

Ec (5)

El primer término representa la letalidad dentro del incendio, mientras que el segundo término (junto con la correspondiente función probit para letalidad), la letalidad fuera del incendio.



Para la expresión anterior esta ha asumido que el incendio es simétrico (esférico) y que la densidad de población es uniforme. Para cálculo del número total de personas con quemaduras de 1er y 2do grado, únicamente el segundo término será empleado. (Assael, 2010).

2.4.3 Explosiones

El comportamiento de una explosión depende de un gran número de parámetros. Un resumen de los parámetros más importantes se muestra en la Tabla 12.

El comportamiento de una Explosión, es difícil de caracterizar. Se han realizado muchos enfoques del problema, incluyendo los estudios teóricos, semi-empíricos y empíricos. A pesar de estos esfuerzos, el comportamiento de la explosión todavía no se entiende por completo. La práctica de los ingenieros, por lo tanto, debe utilizar los resultados extrapolados con cautela y proporcionar un margen adecuado de seguridad en todos los diseños (Assael, 2010).

Una explosión es resultado de la rápida liberación de energía. La liberación de energía debe ser lo suficientemente repentina para causar una acumulación local de energía en el sitio de la explosión. Esta energía se disipa por una variedad de mecanismos, incluyendo la formación de una onda de presión, proyectiles, radiación térmica, y la energía acústica. El daño de una explosión es causada por la energía de disipación (Assael, 2010).

Si la explosión se produce en un gas, la energía hace que el gas se expanda rápidamente, forzando de nuevo el gas circundante y el inicio de una onda de presión que se mueve rápidamente hacia el exterior de la fuente de explosión. La onda de presión contiene energía, lo que resulta en daños al entorno. Para las plantas químicas tanto del daño de las explosiones es debido a esta onda de presión. Por lo tanto, a fin de comprender los impactos de explosión, hay que entender la dinámica de la onda de presión (Assael, 2010).



Tabla 12 Parámetros que afectan Significativamente el comportamiento de las explosiones.

Temperatura ambiente
Presión ambiental
Composición del material explosivo
Propiedades físicas de material explosivo
Naturaleza de la fuente de ignición: tipo, la energía, y la duración
Geometría del entorno: confinado o no confinado
Cantidad de material combustible
La turbulencia de material combustible
Tiempo antes de la ignición
Velocidad a la que se libera el material

Una onda de presión que se propaga en el aire es llamada onda expansiva porque la onda de presión es seguida por un fuerte viento. Una onda de choque o de choque de frente resulta, si el frente de presión tiene un cambio de presión abrupta. Una onda de choque se espera a partir de materiales altamente explosivos, tales como TNT, pero también puede ocurrir a partir de la ruptura repentina de un recipiente a presión. La presión máxima sobre la presión ambiente se llama la sobrepresión pico (Crowl, 2002).

2.4.3.1 Detonación y Deflagración

Los efectos de daño de una explosión, dependen en gran medida de si es resultado, de una explosión de una detonación o una deflagración. La diferencia depende de si el frente de reacción se propaga por encima o por debajo de la velocidad del sonido en los gases sin reaccionar. Para los gases ideales la velocidad del sonido o la velocidad sónica es una función de la temperatura solamente y tiene un valor de 344 m / s (1129 pies / s) a 20 ° C. Fundamentalmente, la velocidad sónica es la velocidad a la que la información se transmite a través de un gas.

En algunas reacciones de combustión, el frente de reacción se propaga por una onda de presión fuerte, que comprime la mezcla que no ha reaccionado en el frente de reacción, por encima de su temperatura de autoignición. Esta compresión se produce rápidamente, resultando en un cambio de presión brusca o frente de choque de la parte delantera de reacción. Esto se clasifica como una detonación, lo que resulta en un frente de reacción y da lugar a una onda de

choque que se propaga en la mezcla sin reaccionar en o por encima de la velocidad sónica (Crowl, 2002).

Para una deflagración la energía de la reacción se transfiere a la mezcla sin reaccionar por conducción de calor y la difusión molecular. Estos procesos son relativamente lentos, haciendo que el frente de reacción se propague a una velocidad menor que la velocidad sónica.

La Figura 6, muestra las diferencias físicas entre una detonación y una deflagración para una reacción de combustión que se produce en la fase de gas en espacio abierto. Para una detonación el frente de reacción se mueve a una velocidad mayor que la velocidad del sonido. Un frente de choque se encuentra a poca distancia en frente del frente de reacción. El frente de reacción proporciona la energía para el frente de choque y continúa conduciéndose a velocidades sónicas o mayores (Crowl, 2002).

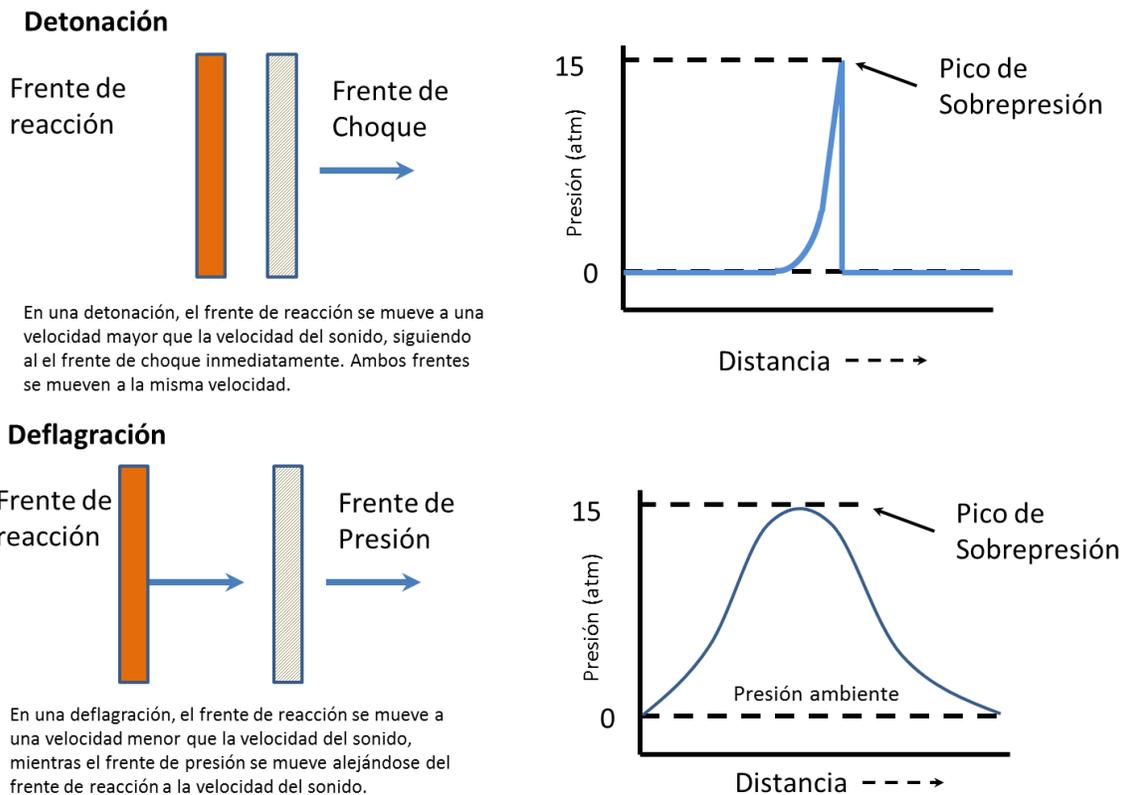


Figura 6 Comparación de la dinámica de una detonación y una deflagración.

Nota. La explosión es iniciada en el extremo izquierdo.



Para una deflagración, el frente de reacción se propaga a una velocidad menor que la velocidad del sonido. El frente de presión se mueve a la velocidad del sonido en el gas sin reaccionar y se aleja de la parte delantera de reacción. Una forma de conceptualizar el frente de presión resultante es considerar el frente de reacción como la producción de una serie de frentes de presión individuales. Estos frentes de presión se alejan de la parte frontal de reacción a la velocidad del sonido y se acumulan juntos en un frente de presión principal. El frente de presión principal seguirá creciendo en tamaño que los frentes de energía y de presión adicionales son producidos por el frente de reacción (Crowl, 2002).

Los frentes de presión producidos por detonaciones y deflagraciones son marcadamente diferentes. Una detonación produce un frente de choque, con un aumento brusco de presión, una presión máxima de mayor de 10 atm, y la duración total de típicamente menos de 1 ms. El frente de presión resultante de una deflagración son característicamente amplias (muchos milisegundos de duración), plana (sin un abrupto frente de choque), y con una presión máxima mucho más baja que la presión máxima para una detonación (típicamente 1 o 2 atm).

Los comportamientos de los frentes y presión de reacción difieren de los mostrados en la Figura 6 en función de la geometría local limitando los frentes. Diferente comportamiento se produce si los frentes se propagan en un recipiente cerrado, una tubería, o por medio de una unidad de proceso congestionado.

Una deflagración también puede evolucionar hacia una detonación. Esto se llama una deflagración a detonación de transición (DDT). La transición es particularmente común en las tuberías, pero poco probable en los vasos o espacios abiertos. En un sistema de tuberías de energía a partir de una deflagración puede alimentar hacia adelante a la onda de presión, lo que resulta en un incremento en el aumento de presión adiabático. La presión se acumula y resulta en una detonación completa (Crowl, 2002).



2.4.3.2 Explosiones de nubes de vapor (VCE)

Si se forma una nube inflamable durante la fuga de gases inflamables, su ignición directa a veces puede dar lugar a un incendio repentino. Sin embargo, su ignición es por alguna razón retardada (5-10 min), entonces la explosión de una nube de vapor (VCE) es el resultado probable.

Para que el encendido tenga lugar, la composición de los gases inflamables en alguna parte de la nube de vapor debe estar comprendida entre los límites de inflamabilidad, mientras que al mismo tiempo una fuente capaz de suministrar la energía requerida (generalmente del orden de 10 J), debe estar disponible. Las variables que influyen en la evolución y la intensidad de una explosión son:

- ❖ El tipo y la cantidad de la sustancia inflamable.
- ❖ El lapso de tiempo desde el inicio de la fuga hasta que la ignición.
- ❖ La configuración del espacio en el que la fuga tuvo lugar.
- ❖ La posición y el número de fuentes de ignición en relación con el lugar de la fuga.

Los efectos perjudiciales de una explosión de nube de vapor se deben principalmente a la sobrepresión (onda de choque) que se crea a partir de la rápida expansión de los productos de la combustión. La onda de choque es la causa más importante de daño a las personas, equipos e instalaciones (Assael, 2010)

Para simular o predecir los efectos de las explosiones de vapor en la nube, se emplean por lo general los siguientes tipos de modelos (Lea & Ledin 2002):

a) modelos analíticos empíricos que se basan por lo general en una sola curva (o familia de curvas) de sobrepresión como una función de la distancia, con parámetros como:

- La parte de la energía que se libera como onda de choque (método de TNT),
- La fuerza de la explosión (método Multi-Energía), o
- La velocidad de expansión de llama (método Baker-Strehlow).

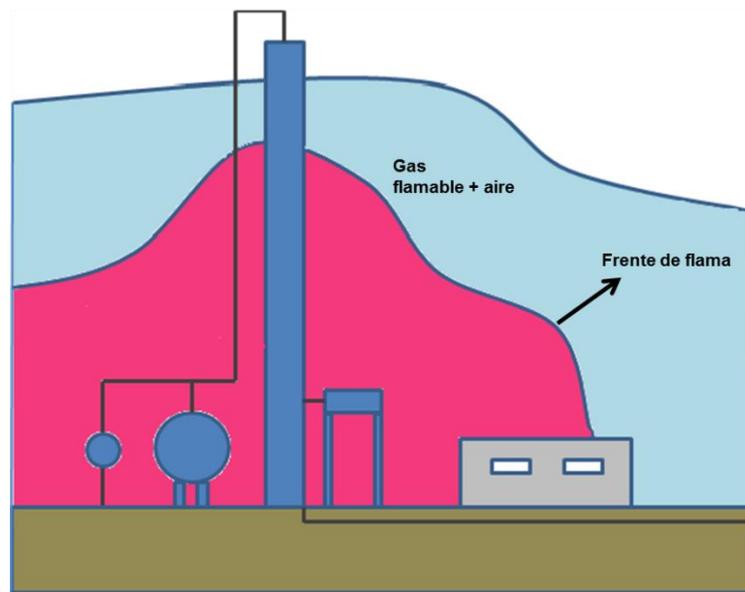
b) los modelos de computadora numérica 3D CFD de volúmenes finitos que se basan por lo general en:

- Análisis turbulento (CFX, EXSIM, EXTASIS, REACFLOW, etc.), o
- Relaciones empíricas (FLACS, AutoReaGas, COBRA, etc.).

2.4.3.3 Mecanismo de expansión de la nube

De acuerdo con Assael (2010), el mecanismo de expansión de la explosión de una nube de vapor se puede analizar en las siguientes etapas:

Etapa 1.- cuando la nube se enciende, la llama comienza a propagarse desde la distancia del punto de ignición, con una velocidad proporcional a la desarrollada por la sobrepresión. La mezcla inflamable de gas y aire se empuja en frente de la llama. En esta etapa el flujo de productos de combustión se puede considerar como laminar. (Figura 7)



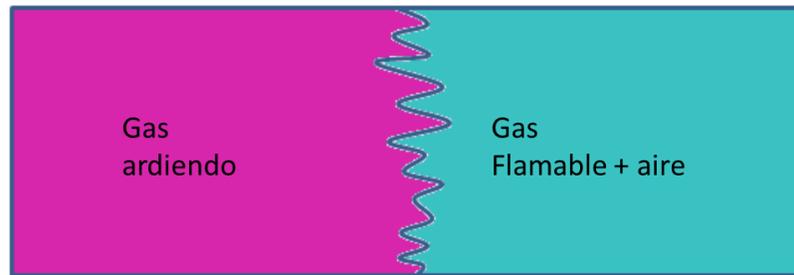
Etapa 1

Figura 7 Etapa 1 Propagación de la flama a través de la nube

Llama la velocidad aproximadamente 5-30 m / s.

Sobrepresión, muy bajo.

Etapa 2.-, Debido a la naturaleza inestable de la llama y grandes remolinos turbulentos, aparece un frente de llama de trama arrugada, resultando en un aumento de la superficie de la llama, por lo tanto un aumento de su velocidad de combustión y en consecuencia su velocidad. (Figura 8)



Etapa 2

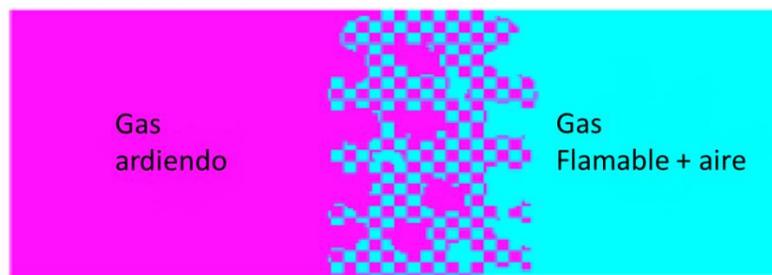
Figura 8 Frente de llama de trama arrugada.

Deflagración.

Velocidad de la llama 30-500 m / s.

Sobrepresión de hasta 2-3 mbar.

Etapa 3.- La presencia de obstáculos respecto a el flujo resulta en un aumento adicional de la velocidad de la llama. El flujo se vuelve turbulento, y el frente de llama se convierte en una zona donde los materiales inflamables y productos de combustión coexisten. Este aumento de superficie produce un aumento adicional de la velocidad de combustión. (Figura 9)



Etapa 3

Figura 9 Etapa 3 Frente de llama turbulenta debido a obstáculos.

Deflagración.

Velocidad de la llama 500-1.000 m / s.

Sobrepresión de hasta 1 bar.

Etapa 4.- La velocidad de la llama sigue aumentando, y la mezcla reactiva en frente de la zona de combustión turbulenta se somete a compresión y calor debido a la mezcla con los productos de combustión. Por lo tanto, temperaturas más altas que el punto de auto-ignición se alcanzan, lo que resulta en la creación de una onda de choque. (Figura 10)

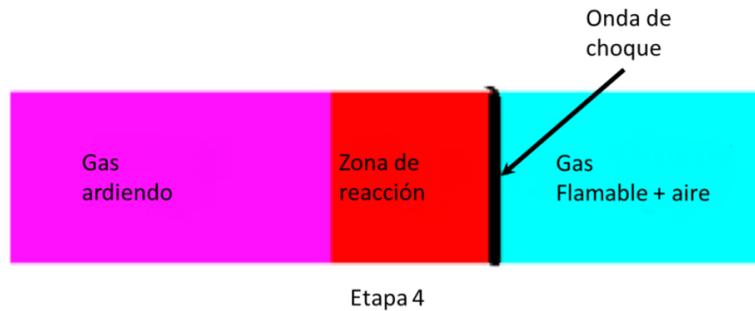


Figura 10 Etapa 4 Creación de onda de choque.

Detonación.

Velocidad de la llama hasta 2.200 m / s.

Sobrepresión de hasta 20 bar.

Etapa 5.- La energía química, se transforma en energía mecánica a través de ondas de choque (transformación 40%). La onda de choque induce un cambio drástico en las propiedades del espacio circundante (presión, densidad, velocidad molecular). Estas propiedades se incrementan de forma instantánea (fase positiva), y luego disminuyó con tasas más lentas a valores inferiores a los del ambiente (fase negativa), para volver poco a poco después a sus valores ambientales. (Figura 11)

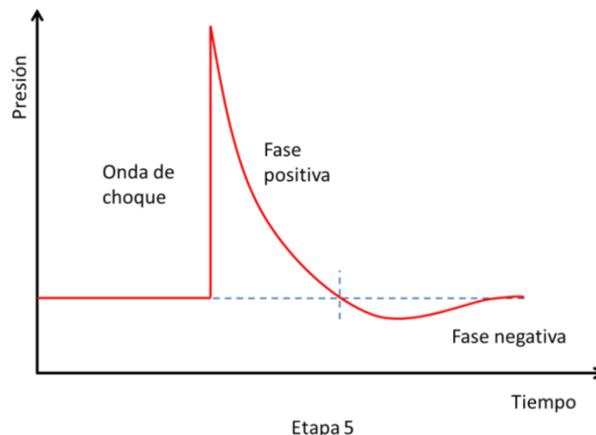


Figura 11 Etapa 5 Curva característica de una detonación.



2.4.4 Efecto de explosiones

Es cierto que los efectos de una explosión en las personas y estructuras serán una función de la sobrepresión generada por la explosión, así como su duración de fase positiva. En las dos secciones siguientes se estudiarán estos efectos.

En la Tabla 13, una serie de criterios empíricos, que conectan la sobrepresión con daños estructurales y otros, se muestran. Estos valores son valores medios empíricos que no toman en cuenta la duración de la fase positiva de la explosión (dos unidades alternativas comunes de presión se emplean en la tabla) (Assael, 2010).

Tabla 13 Alcance de daños en función de la sobrepresión.

	P _s	
	(kPa)	(Bar)
<i>Paneles de vidrio</i>		
Fractura 5%	0.7 - 1	0.007 – 0.01
Fractura 50%	1.4 - 3	0.014 – 0.03
Fractura 90%	3 – 6	0.03 – 0.06
<i>Edificios</i>		
Movimiento de los azulejos	3 - 5	0.03 - 0.05
Destrucción de puertas y marcos de ventanas	6 - 9	0.06 - 0.09
Destrucción de muros 50-70%	35 - 80	0.35 – 0.8
Cerca de la demolición total	80 - 260	0.8 - 2.6
<i>Pilares</i>		
Destrucción	80 - 260	0.8 – 2.6
<i>Árboles grandes</i>		
Destrucción	50 - 100	0.5 – 1.0
<i>Vagones de ferrocarril</i>		
Límite de Descarrilamiento	80 - 190	0.8 – 1.9

Las características más importantes de una onda de choque son la sobrepresión pico P_s (MPa), la duración de la fase positiva, t_p (s), "Impulso", El impulso, en (MPa · s), es la relación del pico de sobrepresión y la duración de la fase positiva.

$$i_s = \int_{t_p} (P_s(t) - P_a) dt,$$

Ec (6)

Donde P_a (MPa), denota la presión ambiente. La expresión anterior se emplea ampliamente en las siguientes secciones en el cálculo de los efectos de una explosión.

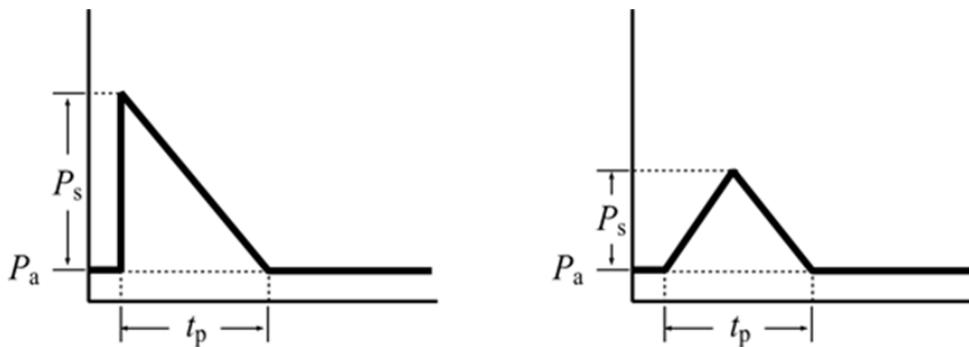


Figura 12 Curvas simplificadas sobrepresión – tiempo.

(Únicamente la curva izquierda es característica de una onda de choque)

Examinando las curvas simplificadas de sobrepresión vs tiempo, que se muestran en la Figura 12, el impulso, aproximadamente, está dada por la expresión:

$$i_s = \frac{1}{2} P_s t_p.$$

Ec (7)

El cuerpo humano puede adaptarse fácilmente a bastante grandes cambios en la presión, si éstas se aplican gradualmente. Grandes cambios repentinos en la presión, sin embargo, pueden dar lugar a daños dramático y posiblemente fatal para los órganos humanos vitales que contienen



aire, sobre todo los pulmones. Además, el oído, aunque menos vital, es más sensible a tales cambios de presión (Assael, 2010).

El análisis que sigue se basa en el cálculo de la probabilidad, $P (-)$, de lesiones o muerte a causa de la explosión, y las siguientes expresiones se emplean:

$$P = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{Pr - 5}{\sqrt{2}} \right) \right], \quad \text{Ec (8)}$$

Donde la función probit, $Pr (-)$, está dada por la expresión,

$$Pr = c_1 + c_2 \ln S \quad \text{Ec (9)}$$

En la expresión anterior, la variable S , se define de acuerdo con el tipo del efecto, con los valores correspondientes para los coeficientes C_1 y C_2 . Los valores para el error de función, se encuentran fácilmente en la literatura *. Cabe señalar, aunque obvio, que la probabilidad de sobrevivir a una lesión es $(1 - P)$ (Assael, 2010)

* $\operatorname{erf}(-z) = -\operatorname{erf}(z)$. Para $z > 0$ y $\text{error} < 5 \times 10^{-4}$ (Abramowitz y Stegun 1970).

$\operatorname{erf}(z) = 1 - (1 + 0.278393z + 0.230389z^2 + 0.000972z^3 + 0.078108z^4) - 4$

2.4.4.1 Efectos sobre los seres humanos

Assael (2010) clasifica los efectos de las explosiones en los seres humanos, en las siguientes categorías:

1) Los efectos directos o primarios: La sobrepresión de la explosión, puede causar daño a los órganos humanos sensibles, o la muerte.



2) Los efectos indirectos: Los efectos indirectos se subdividen en dos categorías:

- Efectos secundarios, se refieren a lesiones o muertes causadas por fragmentos o restos arrojados por la explosión, o
- Efectos terciarios, que se refieren a lesiones o muerte causadas por el desplazamiento de todo el cuerpo y la colisión con objetos o estructuras fijas, como consecuencia de la explosión y el viento asociado.

Una de las razones para la distinción entre los efectos directos e indirectos es que, para los efectos directos, se asegura que una persona va a ser sometido al aumento de presión.

Los efectos indirectos, por otro lado, presente sólo una posibilidad de que una persona podría ser golpeado por los fragmentos o residuos, o que una persona que sufre un desplazamiento de todo el cuerpo puede chocar con un obstáculo (Assael, 2010).

a) Los daños de pulmón

La explosión puede causar una diferencia de presión extrema repentina entre el interior y el exterior de los pulmones, ya que la presión a la que está sometido el cuerpo humano, aumenta de repente. Como consecuencia, el tórax se presiona hacia el interior, causando daño pulmonar y posible muerte. Dado que el proceso de presión hacia dentro se asocia con un tiempo finito, además del valor de la sobrepresión, su duración también es importante.

Con el fin de calcular los daños pulmonares, Bowen et al. (1968), propuso una función probit, que tuvo en cuenta la posición de la persona en el espacio. La función probit se definió como una función de la presión escalada, $\bar{P}(-)$, y el impulso escalado, \bar{I} ($\text{Pa}^{1/2} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1/3}$), ambos definido como:



$$\bar{P} = \frac{P'}{P_a} \quad \text{and} \quad \bar{i} = \frac{i}{m^{1/3} \sqrt{P_a}} = \frac{1}{m^{1/3} \sqrt{P_a}} \left(\frac{1}{2} P' t_p \right).$$

Ec (10)

En la ecuación Ec (10), P'(Pa) denota la sobrepresión total ejercida debido a la posición de la persona, y Pa (Pa), la presión ambiente, respectivamente. La sobrepresión total de, P'(Pa), puede ser más alto que la sobrepresión pico, Ps (Pa), de la onda de choque, ya que puede incluir la presión reflejada en función de la posición del cuerpo humano. La masa, m (kg), se refiere a la masa del cuerpo humano. Por lo general, se toma como:

- 5 kg para los bebés,
- 25 kg para los niños pequeños,
- 55 kg para las mujeres adultas,
- 75 kg para los hombres adultos.

En la Figura 13 se muestran las expresiones empíricas para el cálculo total de la sobrepresión, P '(Pa), para diversas posiciones del cuerpo humano en relación con la propagación de la onda de choque, se dan en (Bowen et al. 1968).

El procedimiento de cálculo de la probabilidad de muerte, P (-), a causa de daño pulmonar causado por el esfuerzo de la diferencia de presión de la explosión, puede ser como sigue:

- En una distancia específica desde el centro de la explosión, la sobrepresión Ps (Pa) y la duración de la fase positiva, tp (s), se calculan.

- A partir de la Tabla 2.9.4, y para una posición específica del cuerpo humano, la sobrepresión totales, P '(Pa), se calcula.

- Se selecciona la masa del cuerpo humano, y por lo tanto el impulso escalado, \bar{i} (Pa^{1/2} · s · kg^{-1/3}), y la presión escalada, \bar{P} (-), se calcula a partir de la ecuación Ec.(10).

- El valor de la función probit se calcula por:

$$Pr = 5.0 - 5.74 \ln S \quad \text{ec (11)}$$

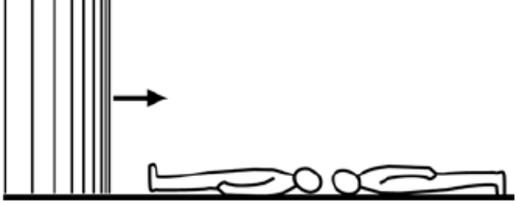
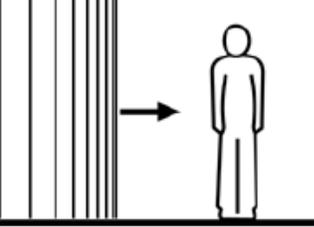
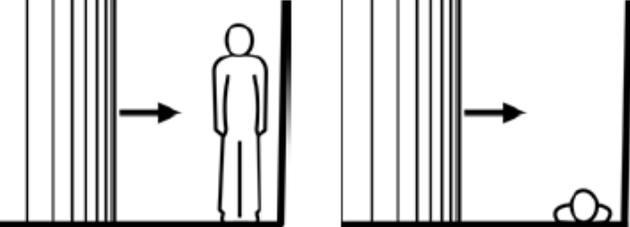
Posición del cuerpo Humano	Sobrepresión Total P' (Pa)
 <p>a) Sin obstrucción de la onda de choque debido al cuerpo humano.</p>	$P' = P_s$
 <p>b) Ondas de choque fluye alrededor del cuerpo humano.</p>	$P' = P_s + \frac{5P_s^2}{2P_s + 14 \times 10^5}$
 <p>c) Reflexión de la onda de choque contra una superficie en el entorno inmediato de la persona.</p>	$P' = \frac{8P_s^2 + P_s 14 \times 10^5}{P_s + 7 \times 10^5}$

Figura 13 Posición del cuerpo humano en relación con la onda de choque.



$$S = \frac{4.2}{P} + \frac{1.3}{i}$$

Donde

ec (12)

- La probabilidad de la muerte, P (-), a causa de daño pulmonar causada por el esfuerzo de la diferencia de presión de la explosión, se calcula a partir de la Ec. (8), a partir del valor de la función probit.

Para calcular la probabilidad de muerte de todas las personas afectada por la sobrepresión, la Ec. (8) debe integrarse en el espacio de acuerdo con el algoritmo descrito en el inciso (c) de la Sección 2.8.5.

b) Ruptura del tímpano

Hirsch (1968), propone que la probabilidad, P (-), de la ruptura del tímpano, se puede calcular de la ecuación. Ec (8), y una función probit con la sobrepresión de pico, PS (Pa), como parámetro, como

$$Pr = -12.6 + 1.524 \ln P_s \quad \text{Ec (13)}$$

c) Impacto en cabeza

Aunque el daño pulmonar o ruptura del tímpano son efectos directos de la onda de choque, el impacto de la cabeza, es un efecto indirecto terciario. La onda de choque puede empujar la cabeza de una persona hacia atrás, resultando en la ruptura o fractura de cráneo, o incluso la colisión de la cabeza con otro objeto estacionario o no estacionario. La posibilidad de la muerte, P (-), después de impacto de la cabeza, se puede calcular de la ecuación (8) y una función probit correspondiente (Baker et al. 1983), como



$$Pr = 5.0 - 8.49 \ln S \quad \text{Ec (14)}$$

Donde

$$S = \frac{2.43 \times 10^3}{P_s} + \frac{4 \times 10^8}{P_s i_s} \quad \text{Ec (15)}$$

d) Desplazamiento cuerpo total por Impacto

La onda de choque también puede lanzar al cuerpo hacia atrás, causando lesiones a causa de su impacto con otros objetos. Estas lesiones son también efectos indirectos terciarios. La probabilidad de la muerte, P (-), después de un tal desplazamiento de todo el cuerpo, puede calcularse a partir de la Ec. (8) y una función probit correspondiente (Baker et al. 1983), como

$$Pr = 5.0 - 2.44 \ln S \quad \text{Ec (16)}$$

Donde

$$S = \frac{7.38 \times 10^3}{P_s} + \frac{1.3 \times 10^9}{P_s i_s} \quad \text{Ec (17)}$$

Se observa que en la ecuación anterior, P_s (Pa) denota la sobrepresión y es i_s (Pa · s) el impulso

e) Los fragmentos y escombros

Heridas o lesiones letales, causadas por fragmentos o residuos constituyen un efecto indirecto secundario. En este caso la probabilidad de muerte, P (-), después del impacto con un fragmento, se puede calcular de la ecuación Ec (8), como una función de una función probit correspondiente (Baker et al. 1983), la velocidad, u (m / s), del fragmento y su masa, m (kg), como



Para

$$0.001 \leq m \leq 0.1 \text{ kg} \quad Pr = -29.15 + 2.10 \ln(mu^{5.115}) \quad \text{Ec (18)}$$

Para

$$0.1 < m \leq 4.5 \text{ kg} \quad Pr = -17.65 + 5.30 \ln\left(\frac{1}{2} mu^2\right) \quad \text{Ec (19)}$$

Para

$$m > 4.5 \text{ kg} \quad Pr = -13.19 + 10.54 \ln(u) \quad \text{Ec (20)}$$

Las funciones probit requieren el conocimiento de la velocidad del fragmento. Se observa que para un impacto con un fragmento de masa 4,5 kg que se mueve con una velocidad de 7 m / s, la probabilidad de supervivencia es insignificante (Baker et al. 1983).

2.4.4.2 Efectos en estructuras

El cálculo de los efectos de la onda de choque en los edificios se llevará a cabo con el uso de funciones probit. La probabilidad de colapso, P (-), del edificio se da, como anteriormente, a partir de la Ec. (8). La probabilidad se obtiene como una función de la sobrepresión pico, Ps (Pa) de la explosión, y el impulso es (Pa · s), dada por la ecuación (7).

Los siguientes casos que se refieren a edificios de hasta cuatro plantas TNO (1989), se presentan:

a) Colapso de edificios

$$Pr = 5.0 - 0.22 \ln S \quad \text{Ec (21)}$$

Donde



$$S = \left(\frac{40,000}{P_s} \right)^{7.4} + \left(\frac{460}{i_s} \right)^{11.3}$$

Ec (22)

b) Daño estructural mayor

$$Pr = 5.0 - 0.26 \ln VS$$

Ec (23)

Donde

$$V = \left(\frac{17,500}{P_s} \right)^{8.4} + \left(\frac{290}{i_s} \right)^{9.3}$$

Ec (24)

c) Daño menor

$$Pr = 5.0 - 0.26 \ln S$$

Ec (25)

Donde

$$V = \left(\frac{4,600}{P_s} \right)^{3.9} + \left(\frac{110}{i_s} \right)^{5.0}$$

Ec (26)

d) Rotura de cristales de ventanas

$$Pr = -16.58 + 2.53 \ln P_s$$

ec (27)

2.5 Efectos a la salud por exposición a humos de incendios

2.5.1 Los productos de la combustión y sus efectos sobre la seguridad humana

La quema de cualquier material o producto combustible produce calor, junto con una atmósfera de humo que, en concentraciones suficientemente altas, presentan condiciones



peligrosas para la exposición humana. Entre los riesgos predominantes, se encuentra la dificultad para ver debida al oscurecimiento por el humo; irritación de la parte superior e inferior del tracto respiratorio; narcosis por inhalación de gases asfixiantes del fuego; y efectos térmicos que incluyen quemaduras.

Estos riesgos se presentan con frecuencia simultáneamente en los incendios. El oscurecimiento de la visión por el humo puede afectar la capacidad de los ocupantes para ver y encontrar eficientemente las rutas de escape. La sensación de irritación sensorial y del tracto respiratorio superior puede exacerbar los efectos del oscurecimiento por el humo, con efectos adicionales sobre la rapidez de movimiento y capacidad para escapar. La depresión del sistema nervioso central, resultando en narcosis, que se puede manifestar en diferentes grados de deterioro de la capacidad de juicio, desorientación, pérdida de coordinación motriz, inconsciencia, y finalmente la muerte. Los efectos del calor producido en incendio van desde la hipertermia hasta quemaduras térmicas de la piel y las vías respiratorias. Los sobrevivientes de un incendio también pueden sufrir complicaciones posteriores a la exposición que pueden conducir posteriormente a la muerte.

2.5.2 El fuego y los materiales combustibles

2.5.2.1 Pirolisis y combustión

Casi todos los materiales poliméricos, tanto naturales como sintéticos, pueden sufrir pirolisis y/o combustión. La pirolisis se define como un “proceso de cambio simultaneo de fase y de especies químicas causados por el calor” y la combustión se define como “un proceso químico de oxidación que ocurre a una velocidad suficiente para producir incremento de temperatura y generalmente se enciende como brasa o llama.” (ASTM, 2001). Los procesos de pirolisis y combustión tienen tanto aspectos físicos como químicos (Beyler, 2002).

Con la aplicación de suficiente energía térmica, los materiales poliméricos, típicamente sufren primero un cambio de fase, como fusión en el caso de los termoplásticos, seguido de descomposición química. Los procesos de descomposición química pueden involucrar varios



mecanismos, como el rompimiento de cadena, eliminación en cadena, y degradación. Estos son procesos endotérmicos que dan como resultado la generación de productos volátiles de bajo peso molecular, que pueden o no sufrir la combustión.

Si la pirolisis produce gases que son por sí mismos combustibles, la combustión puede ocurrir si están presentes el agente oxidante (aire) y la fuente de ignición, siempre y cuando se calienten eleve su temperatura de ignición. Para que el proceso de combustión sea auto-sostenido es necesario que los gases en combustión retroalimenten suficiente energía calorífica al material para que continúe la producción de vapores gaseosos o volátiles combustibles. El proceso es un ciclo cerrado de retroalimentación: el calor transferido al material causa la generación de volátiles inflamables, estos volátiles reaccionan con el oxígeno en el aire para generar calor, y una parte de este calor es transferido otra vez al material para continuar el proceso. Los procesos de oxidación química para la combustión de materiales orgánicos son generalmente exotérmicos, con producción de energía más que suficiente para continuar los procesos de pirolisis y ruptura de enlaces.

2.5.3 Propiedades de inflamabilidad de los materiales

Es difícil generalizar las propiedades de inflamabilidad de los materiales, ya que el comportamiento del fuego está gobernado por varios factores, incluyendo la composición química y estructura del material, el uso de aditivos en sistemas formulados, y hasta las circunstancias del incendio. Polímeros termofijos con gran cantidad de enlaces cruzados arden con menos facilidad que los termoplásticos. Los plásticos celulares (espumas) generalmente que queman muy fácilmente debido a su gran área de superficie y buenas propiedades de aislamiento térmico, que impiden la disipación del calor. Sistemas poliméricos que contienen halógenos [por ejemplo el cloruro de polivinilo (PVC)] se queman con dificultad; sin embargo, la adición de plastificantes aumenta la propensión de los sistemas poliméricos a quemarse. Se emplean aditivos retardantes del fuego, los cuales incluyen compuestos órgano halogenados y organofosforados, lo mismo que varios óxidos e hidratos metálicos, para aumentar la resistencia a la ignición y/o reducir las velocidades de combustión de los sistemas poliméricos (Babrauskas, 1988). Sin



embargo, los polímeros y sistemas poliméricos conteniendo retardantes al fuego todavía se quemarán bajo condiciones térmicas severas.

2.5.4 Gases del incendio

El humo se define comúnmente como “las partículas sólidas y líquidas y gases que se forman cuando un material sufre pirolisis o combustión” (ASTM, 2001). Las partículas y aerosoles producidos afectan principalmente a visibilidad de los ocupantes que tratan de escapar del incendio y se discutirán en una sección posterior. Se considerará primero la formación y toxicidad de los gases comúnmente producidos en los incendios.

2.5.4.1 Monóxido de carbono

El monóxido de carbono (CO) es producido tanto por la combustión en llama como en brasas. La producción de CO en incendios en brasas es un fenómeno de combustión especial, cuya química y física son bastante complejas. Comparada con la combustión con llama, la combustión en brasas es un proceso muy lento. Generalmente se alcanzan concentraciones letales de CO en un recinto típico 1 a 3 horas después del inicio de la combustión en brasas; sin embargo, la transición a combustión con llama usualmente ocurre mucho antes (Ohlemiller, 2002).

La producción de CO por la combustión en llama de los materiales depende en gran medida del suministro de oxígeno. El oxígeno disponible para un incendio se puede limitar ya sea reduciendo el volumen de flujo de aire al incendio.

La formación de CO está relacionada con la proporción combustible-air, (Babrauskas V. L., 1991), que se define como:



$$\varphi = \frac{(kg \text{ combustible}/kg \text{ aire})}{(kg \text{ combustible}/kg \text{ aire})_{\text{estequío}}} \quad (1)$$

Donde “*estequío*” denota las condiciones donde la proporción entre combustible y oxígeno es la requerida para completar la combustión, sin exceso de oxígeno (1 lb = 0.4536 kg). Por lo tanto, cuando $\varphi = 1$, existen las condiciones estequiométricas exactas entre combustible y aire. Para los valores de $\varphi < 1$, el incendio está bien ventilado; para valores de $\varphi > 1$, el incendio es rico en combustible y la ventilación controlada. Estas últimas condiciones favorecen la formación de CO.

Los estudios demuestran que bajo condiciones bien ventiladas ($\varphi \ll 1$) la producción de CO es muy baja (Babrauskas V. L., 1991). Esta producción permanece insignificante hasta que φ llega aproximadamente a 0.5. Después de eso, los productos del CO aumentan rápidamente a medida que los valores de φ aumentan, llegando a un valor casi constante que varía de 0.1 a 0.2 kg de CO/kg de combustible para la mayoría de los materiales. Esta producción de CO corresponde a una relación equivalente a un poco mayor de 1.0.

Para recintos de tamaño moderado, la combustión súbita generalizada o flashover, ocurre aproximadamente cuando φ llega a un valor aproximado de 0.5 (Babrauskas V. L., 1991). Este es también el punto al cual la producción de CO empieza a aumentar dramáticamente. Por lo tanto, el aumento rápido de producción de CO sucede casi simultáneamente con el flashover. Durante el flashover, la velocidad de producción de CO también aumenta considerablemente, porque esta depende de la velocidad de la masa en combustión, la cual se incrementa rápidamente durante el flashover se debe tanto a que la ventilación del incendio se está limitando como al aumento muy rápido en la relación de la masa en combustión. Una vez que φ alcanza un valor de 1.0, la producción de CO se hace más o menos constante, con la velocidad de producción dependiendo solamente de la velocidad de incremento de masa en combustión. Para incendios suficientemente grandes donde el flujo de calor radiante de las llamas y la velocidad de generación de masa de vapor del material se acercan a valores asintóticos, la velocidad de la masa en combustión



permanece casi constante y, en consecuencia, la velocidad de producción de CO, también es más bien constante. (Tewarson, 2002). Estos fenómenos se han observado en pruebas de incendio a gran escala involucrando recintos completamente amueblados (Grand, 1986).

2.5.4.2 Dióxido de Carbono

La relación del dióxido de carbono al monóxido de carbono (CO_2/CO), usada a menudo como característica descriptiva de un incendio, también depende más de las condiciones de ventilación del incendio que de la naturaleza de los materiales en combustión (Babrauskas V. L., 1991). Estudios sobre la dependencia de las relaciones CO_2/CO como proporción de equivalencia, muestran que para incendios bien ventilados (por ejemplo $\phi \ll 1$), esencialmente todo el carbono combustible se oxida como CO_2 . Una vez la proporción de equivalencia ha superado la correspondiente al flashover ($\phi > 1$) indicando un incendio rico en combustible o de ventilación controlada, se ven dos tendencias constantes. Para combustibles que no contienen oxígeno en la molécula, la relación CO_2/CO alcanza una tendencia constante aproximadamente a un valor de 20; para los que contienen oxígeno en su estructura molecular, la relación alcanza la tendencia constante en un valor de aproximadamente 12.5. Por lo tanto, parece que hay un pequeño efecto en la química del combustible en los incendios post-flashover.

2.5.4.3 Cianuro de hidrógeno (ácido cianhídrico)

La generación de cianuro de hidrógeno (HCN) depende tanto del material como de la temperatura. Solamente los materiales que contienen nitrógeno producen HCN, que requiere temperaturas relativamente altas. En contraste con el CO, ha habido suficientes estudios sobre el HCN para poder cuantificar su formación en los incendios. Si hay suficiente oxígeno presente, se pueden también formar concentraciones bajas de óxidos de nitrógeno (NO_x) de los materiales que contienen nitrógeno. Aunque un estudio informo que la producción de NO_x de los combustibles que contienen nitrógeno es mucho menor que la de HCN, hay información contradictoria en la literatura (Tsuchiya, 1989).



2.5.4.4 Ácidos de los Halógenos

Los sistemas poliméricos que contienen halógenos (flúor, cloro, o bromo) producen la formación de los hidrácidos halogenados (HF, HCl y HBr), cuya producción de ellos ocurre, siempre y cuando se alcancen las temperaturas de descomposición térmica. Por ejemplo, el HCl se produce en forma cuantitativa a partir del cloruro de polivinilo (PVC) a temperaturas aproximadas de 225°C a 275°C (437°F a 527°F). (Beyler, 2002). Los hidrácidos halogenados se forman en la parte de pirolisis del proceso de combustión y no se oxidan más allá. Por lo tanto, los ácidos halogenados se producen aunque no ocurra la combustión con llama. Debido a que la eficiencia de producción para la formación de HF, HCl y HBr son casi cuantitativos, se podría esperar mayor producción en los incendios. Sin embargo, las concentraciones de hidrácidos halogenados decaen más bien rápidamente en presencia de superficies adsorbentes y de gotitas de agua presentes en los efluentes de la mayoría de incendios a temperaturas por debajo de 100°C (212°F) (Beitel, 1987). Por lo tanto, rara vez se encuentran en realidad las concentraciones máximas posibles.

2.5.4.5 Irritantes orgánicos

La pirolisis y/o combustión incompleta de los materiales orgánicos pueden producir una amplia variedad de especies orgánicas irritantes. Las más importantes son el formaldehído, aldehídos insaturados (especialmente la acroleína) y los isocianatos (de los Poliuretanos). Se ha demostrado que la acroleína particularmente está presente en las atmósferas de muchos incendios (Burgess, 1979). Esta se forma de la combustión en brasas de todos los materiales celulósicos y de la pirolisis del polietileno (Potts, 1978).

2.5.5 Física de la combustión

Además de los procesos químicos, se debe considerar también la física de la combustión para apreciar completamente el rápido desarrollo de las atmósferas de humo toxón en un



incendio. El tamaño de un incendio se describe generalmente en términos de su velocidad de liberación de energía o calor en kilowatts (kw). Un pequeño incendio limitado al objeto de origen es de aproximadamente 30 a 100kw, mientras que un incendio grande que progresa más allá de su comportamiento de origen (flashover) generalmente es mayor de 1000 kw (1 megawatt) (NFPA, 2009).

La velocidad de pérdida de masa de un incendio (ej., la velocidad a la cual se produce humo) está relacionada a su velocidad de liberación de calor a través del calor efectivo de combustión del combustible. Utilizando un calor efectivo de combustión típico de muchos materiales poliméricos de aproximadamente 25Mj/kg, un incendio de más o menos 1000 kw (1 Mj/s) se traduce en una velocidad de pérdida de masa en el orden de 0.04kg/s. Esta velocidad de pérdida de masa representa aproximadamente la producción de 254 onzas (7200kg) de humo en un incendio de 1000 kw en aproximadamente 3 minutos. Si se asume que los gases del incendio tienen solamente una toxicidad “promedio”, estos podrían ser fatales para las personas expuestas en un recinto típico de 60 m³ (15 x 18 x 8 pies³) en pocos minutos (NFPA, 2009).

La pérdida del conocimiento podría ocurrir en solo 2 a 3 minutos. Los efectos toxicológicos del humo producto de incendio generalmente involucra concentraciones relativamente altas de toxones inhalados durante períodos muy cortos. En consecuencia, muchos criterios usados en la toxicología convencional para describir condiciones riesgosas, como los valores de umbrales limites (TLV's) y los valores de exposición industrial a largo plazo, son normalmente de poca utilidad en la toxicología de la combustión (NFPA, 2009).

2.5.6 Toxicidad de los gases de incendio

Generalmente se considera que los toxones del fuego pertenecen a tres clases básicas: (1) asfixiantes o productores de narcosis; (2) irritantes, que pueden actuar sensibilizando la parte superior del tracto respiratorio o en pulmones; y (3) toxones que muestran otros efectos poco



comunes, aunque siempre es probable la presencia de la tercera clase, existen muy pocos ejemplos documentados (NFPA, 2009).

Esta sección trata sobre la toxicidad de los principales gases de incendios como una descripción general. Se presentan sugerencias para enfoques y criterios de control para la exposición del personal en los incendios más adelante en la sección sobre riesgos toxicológicos de los incendios. (NFPA, 2009).

2.5.6.1 Asfixiantes

En la toxicología de la combustión, el término *narcosis* se refiere a los efectos de los toxones asfixiantes que son capaces de producir depresión del sistema nervioso central, con pérdida del conocimiento y finalmente la muerte. Los efectos de estos toxones dependen de la dosis acumulada, es decir, tanto la concentración como la duración de la exposición. La gravedad de los efectos aumenta con el aumento de la dosis (NFPA, 2009).

Monóxido de Carbono. Los efectos tóxicos del monóxido de carbono son los de la anoxemia. (Smith, 1986). La anoxia es en el cual el suministro de oxígeno (O_2) a los tejidos del cuerpo es insuficiente, y la anoxemia se caracteriza por una disminución de la capacidad de la sangre para transportar oxígenos, a aunque la presión arterial parcial del O_2 y la velocidad de circulación de la sangre sean normales. Esto es debido a la competencia entre el O_2 y el CO por el enlace con el átomo de hierro de grupo hemo de la hemoglobina, siendo la afinidad de enlace del CO con el átomo de hierro de unas 250 veces mayor que por la del O_2 . (Smith, 1986). Incluso la conversión parcial de hemoglobina a carboxihemoglobina (COHb) reduce significativamente la capacidad de transportar el oxígeno de la sangre de manera que se producen signos y síntomas de intoxicación grave. Adicionalmente, la conversión parcial de hemoglobina a COHb hace que el oxígeno que está enlazado como oxihemoglobina (HbO_2) se retenga más fuertemente y esté menos disponible para los tejidos del cuerpo. El grado al cual la hemoglobina de la sangre se convierte a COHb se puede medir fácilmente en un laboratorio clínico y se expresa como porcentaje de saturación de COHb.



Los signos y síntomas producidos por la exposición al CO están directamente relacionados al porcentaje de hemoglobina en la sangre que se convierte en COHb (Roughton, 1944). La muerte de personas expuestas al CO producido en incendios se ha asociado con saturaciones de COHb que van desde 1% a 99%. (Esposito, 1992). Aunque la mayor parte de las muertes se han reportado entre 50 y 70% de COHb, no son raros los valores mayores y menores (Purser, 2002) y (Hirschler, 1993). Los valores bajos de COHb pueden deberse a condiciones fisiológicas preexistentes, como insuficiencia pulmonar o enfermedad cardiovascular, que pueden haber afectado ya a la persona. La alta demanda de oxígeno resultante del esfuerzo físico también puede hacer que la persona sucumba a una saturación baja de COHb. Los valores elevados de COHb en el momento de la muerte se pueden atribuir a la baja demanda de oxígeno de la persona ya sea en reposo o en muy poca actividad física. No hay saturación específica de COHb por debajo de la cual se espera que uno sobreviva ni por encima de la cual puede ocurrir la muerte. Como pasa esencialmente con todas las respuestas biológicas, las saturaciones de COHb asociadas con la muerte se interpretan mejor como una distribución estadística.

A veces, aun en caso de una sola exposición, pueden resultar secuelas permanentes por daño anoxémico en estructuras nerviosas (Smith, 1986). La incidencia mayor de este tipo de daños neurológicos ocurre en las personas de edad (Christian, S. D., 2000).

Los enlaces de O₂ y CO con la hemoglobina ocurren en equilibrio, donde la asociación y disociación tiene lugar. (Smith, 1986). Por lo tanto, el CO y la hemoglobina están en equilibrio con la COHb, y la concentración de COHb depende de la presión parcial (o concentración) de CO en la atmósfera. Cada concentración de CO está asociada con un equilibrio de saturación de COHb, o, en otras palabras, para cualquier valor dado de saturación de COHb hay una concentración mínima de CO que lo alcanzara. A cualquier concentración dada de O₂, se pueden obtener saturaciones de COHb de equilibrio más alto solamente aumentando la concentración de CO.

La competencia entre O₂ y Co por los sitios de enlace en la hemoglobina está definida por la ecuación de Haldane, (Smith, 1986):



$$\frac{(COHb)}{(HBo_2)} = M \frac{(P_{CO})}{(P_{O_2})} \quad (2)$$

Donde

$\frac{(COHb)}{(HBo_2)}$ = relación entre carboxihemoglobina a oxihemoglobina

$\frac{(P_{CO})}{(P_{O_2})}$ = relación entre las respectivas presiones parciales (o concentraciones)

M = una constante, que es independiente en cierto grado de la especie.

El valor M para humanos es aproximadamente 245. La ecuación de Haldane, se usa generalmente para calcular la concentración de CO que estaría en equilibrio con una saturación dada de COHb.

El tiempo requerido para que un ser humano alcance una determinada saturación de COHb se puede aproximar de la ecuación de Steward-Peterson (Stewart, 1973):

$$\%COHb = (3.317 \times 10^{-5}) (\text{ppm CO})^{1.036} (\text{RMV})(t) \quad (3)$$

Donde

ppm CO = concentración de CO en ppm.

RMV = volumen respiratorio por minuto (L/min)

t = tiempo de exposición (min.)

En reposo, el volumen respiratorio por minuto, RMV (para los humanos promedia aproximadamente 8.5 L/min., pero puede aumentar durante actividades intensas hasta 100 L/min.



Utilizando la ecuación de Steward-Peterson se han construido curvas que muestran la relación entre concentración de CO y tiempo de exposición para varios valores de saturación de COHb para humanos (Kaplan H.L., 1984).

En estudios con ratas han demostrado que las temperaturas elevadas tienen un efecto exacerbante sobre la intoxicación con CO, posiblemente por el aumento en el ritmo respiratorio. Esto también puede ocurrir con los humanos (Sanders, 1992).

El tratamiento obvio para las personas expuestas al CO es hacerlas inhalar aire fresco u oxígeno puro. Por ejemplo, el tiempo de vida biológica media en términos de niveles de COHb en la sangre para adultos en reposo respirando aire a 1 atm es de 320 minutos (Smith, 1986). Cuando se suministra oxígeno a 1 atm, el tiempo se reduce a 80 minutos.

Cianuro de hidrógeno (Ácido Cianhídrico). El cianuro de hidrogeno (HCN), aproximadamente 25 veces más tóxico que el monóxido de carbono, es un toxón de acción muy rápida (Swinyard, 1965). La acción del HCN se debe al ión de cianuro, que se forma por hidrólisis en la sangre. A diferencia del CO, que permanece principalmente en la sangre, los iones de cianuro se distribuyen por toda el agua del cuerpo y hacen contacto con las células de tejidos y órganos. Los iones de cianuro reaccionan rápidamente con la enzima citocromo oxidasa para formar el complejo citocromo oxidasa-CN. Y también con la meta-hemoglobina para formar cianometahemoglobina. Si la concentración de iones de cianuro no es suficientemente grande para causar la muerte, los iones son liberados lentamente de los complejos con citocromo oxidasa y meta-hemoglobina y se convierten en iones de tiocianato por la enzima rhodanasa. Este proceso de desintoxicación, junto con el hecho de que el cianuro de distribuye por todo el cuerpo, hace difícil la correlación de contenido de cianuro en la sangre con la exposición real al HCN.

El citocromo oxidasa tiene un papel central en la utilización del oxígeno prácticamente en todas las células. Su inhibición lleva rápidamente a la pérdida de las funciones celulares (anoxia citotóxica), y después a la muerte de las células. En constarte con el CO, los iones de cianuro no disminuyen la disponibilidad del oxígeno, sino más bien, impiden la utilización del oxígeno por



las células. El corazón y el cerebro son especialmente susceptibles a esta inhibición de la respiración celular, habiéndose reportado, en estudios con monos, bradicardia, arritmia cardiaca, y actividad EEG de las ondas cerebrales, indicativas de depresión del sistema nervioso central (Purser D. A., 1984). Aunque frecuentemente se notan irregularidades cardiacas en la intoxicación con HCN, el corazón tiende a durar más que la respiración, y la muerte se debe generalmente a paro respiratorio con origen en el sistema nervioso central.

Una complicación resultante de la inhalación de HCN es la estimulación respiratoria o hiperventilación, presumiblemente debido a que las células quimiorreceptoras reguladoras que responden a la necesidad de oxígeno (Purser, 2002). Esto causa una ingestión más rápida no solamente de HCN sino de otros toxones que puedan estar presentes. El efecto de hiperventilación del HCN también podría ser responsable de la relación dosis-respuesta más bien pronunciada.

La información que relaciona los síntomas en los humanos a varias concentraciones de HCN es muy poca. Una descripción muy consultada de la intoxicación de humanos con HCN informa que pudieran ser tolerados sin dificultad 50 ppm por 30 a 60 minutos, 100 ppm por el mismo período podría ser fatal, 130 ppm puede ser fatal después de 30 minutos, y 181 ppm puede ser fatal después de 10 minutos (Kimmerle, 1974).

El papel del HCN como agente causante de muerte de personas en incendios es mucho menos claro que el CO. Son escasos los casos registrados en los que se puede demostrar que el HCN solo sea el intoxicante principal. Se puede analizar la sangre para buscar cianuro, pero el procedimiento es más complejo que aquel para el CO, y la confiabilidad de los resultados depende más de las condiciones adecuadas de almacenamiento de la sangre antes del análisis. Los análisis se deben interpretar con cuidado, teniendo en cuenta el método analítico utilizado, la historia de almacenamiento de la sangre, y la reputación del laboratorio responsable. Generalmente se cree que las concentraciones de cianuro en la sangre mayores de 1.0 µg/mL son indicativas de posibles efectos toxicológicos significativos debidos a la inhalación de HCN. (Esposito, 1992) y (Halpin, 1978). Los niveles de cianuro en la sangre mayores de 3.0 µg/mL



generalmente se consideran letales. Normalmente se encuentran concentraciones importantes de cianuro en la sangre asociadas con saturación de carboxihemoglobina por inhalación de CO. (Halpin, 1978) y (Harland., 1979). Con frecuencia no se puede determinar con seguridad la contribución de cada uno a la muerte.

No hay evidencia de sinergismo entre el HCN y CO; sin embargo, se reconoce generalmente que estos dos toxones son aditivos en sus efectos (Hartzell G. E., 1985) y (Levin, 1987).

Dióxido de carbono. El dióxido de carbono (CO₂) es bastante bajo en su propia potencia toxicológica y no es, por sí solo, considerado normalmente significativo como toxón en atmósferas de incendio a las cuales pueden estar expuestas las personas. Sin embargo, estimula tanto la velocidad como la profundidad de la respiración, aumentando así el volumen respiratorio por minuto, *RMV*. El *RMV* es aumentado aproximadamente 50% con solamente 2% de CO₂, puede ser hasta 8 a 10 veces normal en presencia de 10% de CO₂. Esta estimulación respiratoria causa la inhalación acelerada de toxones produciendo, por ejemplo, un aumento en la velocidad de formación de COHb en la sangre por inhalación de CO. Sin embargo, se alcanza el mismo equilibrio de saturación de COHb en la sangre que en ausencia de CO₂ (Hartzell G. E., 1985) .

También se ha reportado un incremento en la incidencia de mortalidad de las ratas, con combinaciones de CO y CO₂, especialmente después de la exposición (Levin B. C., 1987). Este efecto puede estar asociado con el daño combinado de acidosis respiratoria (causado por el CO₂) y la acidosis metabólica (causada por el CO), condición de la cual el roedor tiene dificultad para recuperarse después de la exposición. No se ha determinado si este último efecto del CO₂ también con los primates.

Agotamiento de Oxígeno. Como el oxígeno se consume en el proceso de combustión, se debe considerar también el agotamiento o envenenamiento del oxígeno como componente tóxico del humo. Cuando el oxígeno desciende de su nivel normal de 21% en el aire aproximadamente al 17%, se puede afectar la coordinación motriz de la persona. Cuando el oxígeno desciende al



rango de 14 a 10%, la persona puede todavía estar consciente pero puede presentar falla de juicio y se fatigara rápidamente. En el rango de 10 a 6% de oxígeno, la persona pierde el sentido y debe ser revivida con aire fresco u oxígeno en pocos minutos para evitar la muerte. Durante periodos de esfuerzo, el incremento en la demanda de oxígeno puede causar síntomas de deficiencia de oxígeno. (Reinke, 1973).

2.5.6.2 Irritantes.

Los efectos irritantes, producidos por la exposición a prácticamente todas las atmósferas de incendios, que los toxicólogos de la combustión consideran que se pueden clasificar normalmente de dos tipos: (1) irritación sensorial, incluyendo irritación de los ojos y el tracto respiratorio superior; y (2) irritación pulmonar (NFPA, 2009).

La mayoría de irritantes del fuego produce signos y síntomas característicos de ambas, irritación sensorial y pulmonar.

La irritación de los ojos, es un efecto inmediato que depende principalmente de la concentración del irritante, puede perjudicar notablemente el escape de la víctima de un incendio. Las terminales nerviosas en la córnea son estimuladas causando dolor, parpadeo reflejo, y lagrimeo. La irritación severa también puede producir, posteriormente, daño grave a los ojos. Las víctimas pueden cerrar sus ojos, aliviando parcialmente estos efectos; sin embargo, esta acción puede también limitar su escape del incendio (NFPA, 2009).

Los irritantes sólidos suspendidos en los gases también se introducen en el tracto respiratorio superior causando una sensación de ardor en la nariz, boca y garganta, junto con la secreción de moco. Estos efectos sensoriales también están principalmente ligados a la concentración del irritante y normalmente no aumenta su gravedad a medida que aumenta el tiempo de exposición.



Después de las señales de irritación sensorial inicial, cantidades significativas de irritantes inhalados pueden también introducirse rápidamente en los pulmones, mostrando síntomas de irritación pulmonar. La irritación pulmonar a menudo se caracteriza por la tos y broncoconstricción, y aumento en resistencia al flujo pulmonar. La inflamación y daño de los tejidos, edema pulmonar, y la muerte ulterior pueden seguir a la exposición a altas concentraciones, usualmente dentro de 6 a 48 horas. La inhalación de irritantes pulmonares también parece aumentar la susceptibilidad a infección bacteriana post-exposición. A diferencia de la irritación sensorial, los efectos de la irritación pulmonar dependen tanto de la concentración del irritante como de la duración de la exposición (NFPA, 2009).

En los incendios se puede formar tanto irritantes inorgánicos (ejemplo, ácidos halogenados, óxidos de nitrógeno) como irritantes orgánicos (ejemplo, aldehídos).

Ácidos Halogenados (Hidrácidos de los Halógenos). Los ácidos halogenados (son realmente hidrácidos de los halógenos) han sido objeto de atención especial, siendo el más importante el cloruro de hidrógeno o ácido clorhídrico (HCl) producido por la descomposición del cloruro de polivinilo (PVC). El HCl es un potente irritante sensorial y pulmonar. Concentraciones tan bajas como 75 a 100 ppm son extremadamente irritantes para los ojos y el tracto respiratorio superior, sugiriendo posible deterioro de la actividad física, como el escape (Kane, 1979). Aunque se ha encontrado que el HCl no es incapacitante para los mandriles sometidos a concentraciones hasta de 17000 ppm durante 5 minutos, se han reportado muertes posteriores a la exposición que no parecía incapacitante (Kaplan H. L., 1985). No se han realizado estudios comparables usando humo real de PVC.

Otro estudio, usando mandriles expuestos a humo de PVC durante 15 minutos que contenía 5000 ppm de HCl no mostró ningún deterioro de la función pulmonar relacionada con el humo cuando se probaron 3, 90, 180 y 360 días después de la exposición (Kaplan H. L., 1993). Sin embargo, se observaron lesiones de las superficies mucosas de la boca, junto con evidencia de broncoconstricción y bajos niveles de PaO₂ durante la exposición.



Ha habido gran controversia en relación a la concentración de HCL que puede ser peligrosa para el ser humano. Es cuestionable que la información de numerosos estudios con roedores se pueda extrapolar directamente a los humanos debido a diferencias anatómicas significativas entre los tractos respiratorios del roedor y del primate, que a su vez, resultan en respuestas muy diferentes al HCl. Los roedores muestran una pequeña reducción en el ritmo y volumen respiratorio en la exposición al HCl, mientras que se ha demostrado que estos valores aumentan en los primates (Kaplan H.L., 1993). Es interesante que las dosis de exposición (concentración x tiempo) de HCl que causan mortalidad post-exposición en las ratas estén en el mismo rango que las que causaron muertes post-exposición a los mandriles (Hartzell G. E., 1985). Sin embargo, la información sobre mandriles es muy limitada, y la comparación hecha es más bien subjetiva. De los estudios que utilizan la exposición de los mandriles, el HCl no parecía ser incapacitante físicamente, ni parecía que produjera complicaciones respiratorias crónicas significativas después de exposiciones cortas de 5000 ppm y menos. Aunque se pueden sufrir síntomas agudos, que varían desde malestar grave a daños notorios del tejido respiratorio superior, no se esperarían cambios importantes en la función pulmonar, excepto a concentraciones más altas.

Pero sería prudente, sin embargo, reconocer que el HCl puede ser peligroso para los humanos a concentraciones mucho más bajas que las indicadas en los estudios con mandriles. Se observó evidencia de bronco constricción y niveles marcadamente reducidos de PaO₂ por inhalación de HCl a los mandriles (Kaplan H.L., 1993), que sugiere la posibilidad de efectos adversos en los humanos. Además, las personas que tienen funciones pulmonares comprometidas preexistentes pueden ser más susceptibles que las personas saludables.

Los aditivos retardantes del fuego basados en cloro o bromo también son una fuente de hidrácidos halogenados en incendios, siendo los fluoropolímeros la fuente principal de HF. Aunque los estudios usando los otros ácidos halógenos, HF y HBr, han sido muy limitados, parecería que estos gases ácidos muestran efectos irritantes similares a los del HCL en concentraciones comparables (Purser, 2002).



Óxidos de Nitrógeno. El dióxido de nitrógeno (NO_2) y el óxido nítrico (NO) son los principales componentes de la mezcla de óxidos de nitrógeno generalmente conocida como NO_x . El óxido nítrico es solamente como una quinta parte de potente que el NO_2 (Tsuchiya, 1989). Los estudios con ratas expuestas al NO_2 bajo métodos de prueba de toxicidad del humo, demuestran que el NO_2 tiene un potencial letal comparable al HCN (Levin B. C., 1989). En contraste con el HCN, la toxicidad del NO_x se debe principalmente a sus propiedades como irritante pulmonar, siendo la muerte de las ratas post-exposición, generalmente en un día.

Irritantes Orgánicos. Aunque se pueden producir numerosos irritantes orgánicos en los incendios, solamente la acroleína ha recibido suficiente atención en la toxicología de la combustión. Concentraciones de acroleína tan pequeñas como unas pocas partes por millón son muy irritantes para los ojos y tracto respiratorio superior. Es interesante anotar que estudios con mandriles demostraron que concentraciones hasta 2780 ppm durante 5 minutos no fueron incapacitantes físicamente durante la exposición (Kaplan H. L., 1985). Sin embargo, complicaciones pulmonares causadas por esas concentraciones y hasta menores, produjeron la muerte unas horas después de la exposición.

En ausencia de otra información, una pérdida de masa de material orgánico producida en la combustión de un gramo por cada metro cúbico de volumen se ha propuesto como potencialmente incapacitante debido a la irritación sensorial, con una pérdida de masa de 10 gramos por cada metro cúbico se presentan condiciones altamente peligrosos de irritación pulmonar (1 onza = 28.36 gr; 1 pie³ = 0.0283 m³) (Purser, 2002).

2.5.7 Riesgos Tóxicos de los incendios

La retrospectiva sugiere que los primeros investigadores de toxicología del humo tal vez estaban demasiado obsesionados con los métodos de prueba para materiales y productos y pudieron haber perdido de vista el objetivo real (la seguridad Humana de las personas). La ingeniería de protección contra incendios enfoca ahora este objetivo estipulando la evaluación de



riesgos de incendio en modelos matemáticos con la utilización de varios parámetros de incendios, incluyendo la toxicidad del humo. El input de toxicidad del humo para estos modelos es suministrado por ISO TC92/SC3, *Subcommittee on fire Threat to People and the Environment* (subcomité sobre Amenaza del Fuego para las Personas y el Medio Ambiente) (ISO, 2002).

Un elemento clave en la evaluación de la amenaza para la vida por riesgos tóxicos de los incendios es la estimación de la condición del ocupante en cada incremento del tiempo expuesto que resulta en la evaluación del tiempo disponible para escape seguro. Haciendo esto, los efectos de los toxones asfixiantes e irritantes sensoriales y del tracto respiratorio superior se consideran por separado. Esto se debe a que los efectos asfixiantes están relacionados con sus dosis acumuladas (concentración x tiempo), mientras los efectos de los irritantes sensoriales y respiratorios se relacionan principalmente con su concentración.

La evaluación de riesgo tóxico puede tener una o dos formas dependiendo de la naturaleza de los datos disponibles en el input (Hartzell G. E., 1994). La primera es un modelo de gas toxón. Requiere un input del perfil de concentración-tiempo de cada gas toxón presente, junto con la concentración x tiempo (dosis) de cada asfixiante y la concentración de cada irritante que se esperaría causara incapacidad. Este modelo es muy útil en la consideración de incendios donde la información de concentración-tiempo puede ser medida o estimada a partir de modelos de desarrollo de incendios. Alternativamente, se puede usar un modelo de pérdida de masa. El modelo de pérdida de masa requiere como input la pérdida de masa de los materiales o productos en el incendio como función de tiempo, junto con las dosis de concentración-tiempo que se espera causarán incapacidad debida al humo producido por esos materiales o productos. Los últimos valores se derivan de métodos de pruebas de laboratorio. (ej., ASTM E1678, NFPA 269, ISO 13344).

El principio básico para modelar el componente asfixiante del riesgo toxón involucra el mismo concepto FED usado para calcular los valores de LC_{50} de la información analítica. Sin embargo, en lugar de determinar el FED acumulado en 30 minutos para una exposición por medio de la suma de 0 a 30 minutos, se determina el tiempo en el que el valor FED acumulado



igual a un criterio de umbral determinado, (ISO, 2002). Por ejemplo, el tiempo requerido para alcanzar FED=1 se puede definir como el tiempo esperado más frecuentemente para que ocurra la incapacidad. Se sugiere en ISO TS 13571 que se use un criterio de umbral de FED=0.3 o menor para las sub-poblaciones más susceptibles.

La forma de la ecuación 4 para incapacidad debida a asfixiantes es

$$FED = \sum_{t1}^{t2} \frac{[CO]}{35000 \text{ ppm} \cdot \text{min}} \Delta t + \sum_{t1}^{t2} \frac{\exp\left(\frac{[HCN]}{43}\right)}{220 \text{ min}} \Delta t \quad (4)$$

Donde las concentraciones de CO y HCN están en ppm. La ecuación (4) se deriva de experimentos reales de incapacidad usando primates no humanos. Es la más aplicable cuando las concentraciones de oxígeno no son menores de 13%, y las concentraciones de CO₂ no son mayores de 2% (Purser, 2002) y (Kaplan H. L., 1985).

El componente irritante sensorial y respiratorio del riesgo toxón se maneja de una manera más o menos análoga, con excepción de que se usan concentraciones, en lugar de dosis acumuladas. Para los irritantes, el tiempo en el cual la concentración efectiva fraccional total (FEC) se hace igual a 1 se puede definir como el tiempo en que se espera más frecuentemente que ocurra la incapacidad.

Una ecuación genérica para la incapacidad debida a irritante sensorial y respiratorio es

$$FEC = \frac{[HCl]}{F_{HCl}} + \frac{[HBr]}{F_{HBr}} + \frac{[HF]}{F_{HF}} + \frac{[SO_2]}{F_{SO_2}} + \frac{[NO_2]}{F_{NO_2}} + \frac{[acroleina]}{F_{acroleina}} + \frac{[formaldehido]}{F_{formaldehido}} + \sum \frac{[irritante]_i}{F_{Ci}} \quad (5)$$

Donde las concentraciones de irritantes están en ppm.

El establecimiento de criterio de umbral de incapacidad para los irritantes ha sido muy controversial, ya que se han hecho muy pocos estudios controlados en relación con los efectos de



la exposición humana; la mayoría de la información ha sido solamente anecdótica. Tomando el conocimiento experto de la información relevante publicada, la ISO TS 13571 sugirió los siguientes factores de concentración para usos en la ecuación (5). (ISO, 2002).

Tabla 14 Factores de concentración.

F_{HCl}	1000 ppm	F_{NO2}	250 ppm
F_{HBr}	1000 ppm	$F_{acroleína}$	30 ppm
F_{HF}	500 ppm	$F_{formaldehído}$	250 ppm
F_{SO2}	150 ppm		

Además se sugiere en ISO TS 13571 que se emplee un criterio de FEC de 0.3 o meno para cubrir las sub-poblaciones más susceptibles.

No se pueden determinar ni predecir fácilmente las concentraciones de toxones de gases del incendio como función de tiempo en muchos casos. No obstante, se puede emplear el concepto básico FED usando el modelo de pérdida de masa que se muestra en la ecuación (6). (ISO, 2002).

$$FED = \sum_{i=1}^n \sum_{t1}^{t2} \frac{\Delta m}{V(Cti)} \Delta t \quad (6)$$

Donde

Δm = promedio acumulado de pérdida de masa (g) Durante el incremento de tiempo, Δt

V = volumen (m^3) en el cual se dispersan los efluentes del fuego.

Δt = incremento de tiempo (minutos)

$(Cti) = \frac{1}{2} (LC_i)_i$ en $g \cdot m^3 \text{ min}$ determinados de los métodos de prueba (NFPA 269 y ASTM E1678).



Igual que el modelo de gas toxón, el tiempo requerido para alcanzar a $FED = 1$ puede definirse como el tiempo esperado más frecuentemente para que ocurra la incapacidad. De nuevo se sugiere en ISO TS 13571 que se use un criterio de 0.3 o menor para cubrir las sub-poblaciones más susceptibles (ISO, 2002).

El modelo de pérdida de masa representa una simplificación considerable para la evaluación de los efectos de las atmósferas de combustión peligrosas para la vida. Una simplificación ulterior emplea un valor “genérico” de LC_{t50} de potencial tóxico letal cuando el combustible en un incendio es una mezcla de materiales y productos no identificado en relación con su naturaleza y cantidad relativa. Los valores genéricos de LC_{t50} son $900 \text{ g m}^{-3} \text{ min}$ para incendios pre-flashover bien ventilados y $450 \text{ g m}^{-3} \text{ min}$ para incendios *post-flashover* empobrecidos de oxígeno (ISO-2002). Para la incapacidad, los valores de (Ct_i) en la ecuación (6) entonces se convierten en $450 \text{ g m}^{-3} \text{ min}$ para incendios pre-flashover bien ventilados y $220 \text{ g m}^{-3} \text{ min}$ para incendios post-flashover de escasa concentración de oxígeno. Se advierte que estos valores genéricos LC_{t50} representan solamente una aproximación y se debe someter al juicio experto toxicológico y de ingeniería.

2.5.8 Variabilidad de la respuesta humana a los gases de incendio

La variabilidad de las respuestas de las personas en forma individual a los efectos toxones de los incendio esta mejor representada por la distribución estadística que tiene en cuenta sus susceptibilidades. La población humana en general contiene varias subpoblaciones que muestran una sensibilidad más que promedio a los toxones de gases. La mayor de estas subpoblaciones son los jóvenes, los ancianos y aquello que sufren complicaciones respiratorias (por ejemplo los asmáticos). Aunque realmente no tienen incapacidades pre-existentes, los infantes y niños pequeños son especialmente susceptibles a los toxones asfixiantes debido al mayor volumen de aire inhalado por minuto en relación a su peso corporal. Los ancianos, especialmente aquellos con sistema cardiovascular comprometido, también son particularmente susceptibles a los toxones asfixiantes (Hoel, 1962).



Los asmáticos, junto con los que sufre de otros problemas pulmonares como bronquitis crónicas y síndrome reactivo de disfunción de vías de aire (RADS), son especialmente susceptibles a bronco-constricción aun en cortas exposiciones a concentraciones bajas de irritantes, que pueden producir el colapso y hasta la muerte. Para proveer un grado de protección a estas sub-poblaciones más vulnerables, los niveles seguros de exposición de la población humana a los toxones de gases de incendios siempre deben ser mucho más bajos que aquellos que pudieran causar incapacidad u otros efectos adversos a los adultos jóvenes sanos (Hoel, 1962).

De acuerdo con la metodología descrita, los valores de FED y/o FEC de 0.1, están asociados con efectos sub-letales que incapacitarían a personas de susceptibilidad promedio. En ausencia de información contraria, la elección razonable es la distribución logarítmica normal de la respuesta humana, con valores FED y/o FEC de 0.1 correspondientes al valor intermedio de la distribución. (La mitad de la población sería más susceptible al daño y la otra mitad sería menos susceptible.) Las estadísticas entonces muestran que un criterio de FED y/o FEC de 0.3, 11.4 % de la población sería susceptible a exposiciones menos graves (menores de 0.3) y, por lo tanto, estarían estadísticamente sujetas a incapacidad. Criterios más bajos reducirían esa parte de la población. Sin embargo, ningún criterio por bajo puede ser estadísticamente seguro para todas las personas (Hoel, 1962).

Una consecuencia de la distribución estadística de la respuesta humana resultante de la exposición de las personas a atmósferas de humo es que la distribución para dos de esas respuestas, como incapacidad y muerte, puede superponerse. Esto aumenta la probabilidad de que algunos podrían morir sin que otros tan siquiera se incapaciten. Se sabe, naturalmente, que esto ocurre en incendios reales (Hoel, 1962).

2.6 Marco legal

En México, la realización de los estudios para la identificación de los peligros y evaluación de los riesgos que estos representan, son ordenamientos legales que se desprenden de la constitución y las leyes que de ella emanan:



2.6.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos

Artículo 132. Son obligaciones de los patrones:

I.- Cumplir las disposiciones de las normas de trabajo aplicables a sus empresas o establecimientos.

2.6.2 Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente

Artículo 30, párrafo II... “Cuando se trate de actividades consideradas altamente riesgosas en los términos de la presente Ley, la manifestación (Se refiere a la Manifestación de Impacto Ambiental) deberá incluir el estudio de riesgo correspondiente”.

Capítulo V Actividades consideradas Altamente Riesgosas

- Artículo 146, ... la clasificación de las actividades que deban considerarse altamente riesgosas en virtud de las características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológico-infecciosas para el equilibrio ecológico o el ambiente, de los materiales que se generen o manejen en los establecimientos industriales, comerciales o de servicios, considerando, además, los volúmenes de manejo y la ubicación del establecimiento.
- Artículo 147... Quienes realicen actividades altamente riesgosas, en los términos del Reglamento correspondiente, deberán formular y presentar a la Secretaría un *estudio de riesgo ambiental*, así como someter a la aprobación de dicha dependencia y de las Secretarías de Gobernación, de Energía, de Comercio y Fomento Industrial, de Salud, y del Trabajo y Previsión Social, los programas para la prevención de accidentes en la realización de tales actividades, que puedan causar graves desequilibrios ecológicos.



2.6.3 Primer listado de actividades altamente riesgosas (manejo de sustancias tóxicas)

- Artículo 1º. “Se considerará como actividad altamente riesgosa, el manejo de sustancias peligrosas en un volumen igual o superior a la cantidad de reporte”.

2.6.4 Segundo listado de Actividades altamente riesgosas (manejo de sustancias inflamables y explosivas)

- Artículo 1o.- Se expide el segundo listado de actividades altamente riesgosas que corresponde a aquéllas en que se manejen sustancias inflamables y explosivas.

2.6.5 Reglamento de LGEEPA, 2014

Artículo 17,...cuando se trate de actividades altamente riesgosas en los términos de la Ley, deberá incluirse un estudio de riesgo.

Artículo 18.- El estudio de riesgo a que se refiere el artículo anterior, consistirá en incorporar a la manifestación de impacto ambiental la siguiente información:

- I. Escenarios y medidas preventivas resultantes del análisis de los riesgos ambientales relacionados con el proyecto;
- II. Descripción de las zonas de protección en torno a las instalaciones, en su caso, y
- III. Señalamiento de las medidas de seguridad en materia ambiental.

2.6.6 Ley Federal del Trabajo

Artículo 132, disposiciones:

- XVI. Instalar y operar las fábricas, talleres, oficinas, locales y demás lugares en que deban ejecutarse las labores, de acuerdo con las disposiciones establecidas en el reglamento y las normas oficiales mexicanas en materia de seguridad, salud y medio ambiente de trabajo, a



efecto de prevenir accidentes y enfermedades laborales. Asimismo, deberán adoptar las medidas preventivas y correctivas que determine la autoridad laboral;

- XVIII. Fijar visiblemente y difundir en los lugares donde se preste el trabajo, las disposiciones conducentes de los reglamentos y las normas oficiales mexicanas en materia de seguridad, salud y medio ambiente de trabajo, así como el texto íntegro del o los contratos colectivos de trabajo que rijan en la empresa; asimismo, se deberá difundir a los trabajadores la información sobre los riesgos y peligros a los que están expuestos;

2.6.7 Reglamento Federal de Seguridad y Salud en el Trabajo

Artículo 7. Son obligaciones de los patrones:

- I. Contar con un Diagnóstico de Seguridad y Salud en el Trabajo y los estudios y análisis de Riesgos requeridos por el presente Reglamento y las Normas, que forman parte del referido diagnóstico;

Artículo 19. Para la prevención y protección contra incendios, los patrones deberán:

- I. Clasificar el Riesgo de incendio del Centro de Trabajo, de modo integral o por áreas específicas;

Artículo 20. Para la utilización de maquinaria, equipo y herramientas, los patrones deberán:

- I. Elaborar un estudio para analizar el Riesgo a que están expuestos los trabajadores;

Artículo 22. Para el manejo, transporte y almacenamiento de Sustancias Químicas Peligrosas, los patrones deberán:



- I. Elaborar un análisis de Riesgos sobre las Sustancias Químicas Peligrosas que manejen, transporten o almacenen;

Artículo 51. Para la selección y uso del Equipo de Protección Personal, los patrones deberán:

- I. Efectuar la identificación y análisis de los Riesgos a que están expuestos los trabajadores por cada puesto de trabajo o área del Centro de Trabajo;

Artículo 54. Para la administración de la seguridad de los procesos y equipos críticos donde se manejen Sustancias Químicas Peligrosas, los patrones deberán:

- I. Contar con un análisis de los Riesgos asociados a cada uno de los procesos y equipos críticos donde se manejen Sustancias Químicas Peligrosas que puedan ocasionar accidentes mayores;

El análisis a que se refiere la fracción I anterior, se podrá acreditar mediante el estudio de riesgo ambiental que haya presentado conforme a lo dispuesto en el artículo 147 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y, en su caso, el programa para la prevención de accidentes, aprobado en los términos que señale dicho ordenamiento.

2.6.8 Normas Oficiales Mexicanas

NOM-002-STPS-2010 Condiciones de Seguridad-Prevención y protección contra incendios en los centros de trabajo.

5.1 Clasificar el riesgo de incendio del centro de trabajo o por áreas que lo integran, tales como plantas, edificios o niveles, de conformidad con lo establecido por el Apéndice A de la presente Norma.



NOM-005-STPS-1998 Relativa a las condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo para el manejo, transporte y almacenamiento de sustancias químicas peligrosas.

5.2 Elaborar y mantener actualizado, en cuanto a los cambios de procesos o sustancias químicas peligrosas presentes en el centro de trabajo, un estudio para analizar los riesgos potenciales de sustancias químicas peligrosas conforme a lo establecido en el apartado 7.1.

7.1 El estudio para analizar el riesgo potencial debe realizarse tomando en consideración lo siguiente:

- a) las características de los procesos de trabajo;
- b) las propiedades físicas, químicas y toxicológicas de las sustancias químicas peligrosas;
- c) el grado y tipo de riesgo de las sustancias, conforme a lo establecido en la NOM-114-STPS-1994;
- d) las actividades peligrosas y los trabajos en espacios confinados,
- e) las zonas de riesgo del centro de trabajo y el número de trabajadores expuestos en cada zona.

NOM-017-STPS-2008 Equipo de protección personal-Selección, uso y manejo en los centros de trabajo.

5.2 *Identificar y analizar los riesgos* de trabajo a los que están expuestos los trabajadores por cada puesto de trabajo y área del centro laboral. Esta información debe registrarse y conservarse actualizada mientras no se modifiquen los implementos y procesos de trabajo, con al menos los siguientes datos: tipo de actividad que desarrolla el trabajador, tipo de riesgo de trabajo identificado, región anatómica por proteger, puesto de trabajo y equipo de protección personal requerido.

NOM-028-STPS-2012 Sistema para la administración del trabajo-Seguridad en los procesos y equipos críticos que manejen sustancias químicas peligrosas.

7.1 El análisis de riesgos de los procesos y equipos críticos que manejen sustancias químicas peligrosas deberá considerar, al menos:



- a) Los objetivos, alcance y tiempos para realizar el análisis de riesgos del proceso;
- b) La recopilación de la información siguiente:
 - 1) La descripción del proceso y/o equipo crítico;
 - 2) Las condiciones de operación del proceso y/o equipo crítico;
 - 3) Los diagramas y planos del proceso y/o equipo crítico;
 - 4) Los diagramas de tuberías, instrumentos y controles (planos de instalaciones);
 - 5) Los planos de diagramas eléctricos y listas de alarmas e interruptores;
 - 6) Las hojas de datos de seguridad de las sustancias químicas peligrosas;
 - 7) El sistema de identificación y comunicación de peligros y riesgos para las sustancias químicas peligrosas;
 - 8) Las instrucciones o procedimientos de operación con sustancias químicas peligrosas;
 - 9) Los reportes sobre accidentes ocurridos en el centro de trabajo o en procesos similares;
 - 10) El análisis de riesgos previos, en su caso, y
 - 11) El plano de la planta con la localización de los procesos y equipos críticos que manejen sustancias químicas peligrosas;
- c) La identificación y evaluación de los riesgos asociados con el proceso y/o equipo crítico que considere, al menos, lo siguiente:
 - 1) Las propiedades físicas y químicas de las sustancias químicas peligrosas;
 - 2) La historia operativa del proceso, tal como la frecuencia de emisiones químicas, la edad del proceso y cualquier otro factor relevante;

7.2 El análisis de riesgos de los procesos y equipos críticos que manejen sustancias químicas peligrosas deberá actualizarse:

- a) Cada cinco años;
- b) Antes de ejecutar modificaciones a los procesos y equipos críticos;
- c) Cuando se proyecte un nuevo proceso, y
- d) Como resultado de la investigación de un accidente mayor.



2.6.9 Convenios Internacionales Relacionados con la seguridad y salud en el trabajo

C155 - Convenio sobre seguridad y salud de los trabajadores, 1981 (núm. 155)

El presente Convenio se aplica a todas las ramas de actividad económica. Esta política tendrá por objeto prevenir los accidentes y los daños para la salud que sean consecuencia del trabajo, guarden relación con la actividad laboral o sobrevengan durante el trabajo, reduciendo al mínimo, en la medida en que sea razonable y factible, las causas de los riesgos inherentes al medio ambiente de trabajo.

C170- Convenio sobre los productos químicos, 1990 (núm.170)

El presente Convenio se aplica a todas las ramas de actividad económica en las que se utilizan productos químicos.

- (a) Garantizando que todos los productos químicos sean evaluados, con el fin de determinar el peligro que presentan.
- (b) Proporcionando a los empleadores sistemas que les permitan obtener de los proveedores información sobre los productos químicos utilizados en el trabajo, contra los peligros provocados por los productos químicos.
- (c) Proveyendo a los trabajadores de información sobre los productos químicos, así como sobre las medidas y programas adecuados de prevención.
- (d) Estableciendo las orientaciones básicas de dichos programas para garantizar la utilización de los productos químicos en condiciones de seguridad.

2.6.10 Normativa Internacional en análisis de riesgos.

API-752 “Management of hazards associated with location of process plant permanent buildings”

API-750 “Management of process hazards”

API-780 “Security Risk Assessment methodology for the Petroleum and petrochemical Industries



CEI IEC 61882 Norma Internacional Estudios de Peligros y operabilidad (estudios HAZOP)-
guía de aplicación

IEC -61511 Seguridad Funcional-sistemas Instrumentados de seguridad para el sector de la
industria de proceso

ANSI-ISA-84.01 Seguridad funcional-Sistemas Instrumentados de seguridad para los procesos
del sector industrial

29 CFR-1910.119. OSHA Process safety management of highly hazardous chemicals,
occupational safety and health administration. Federal register, vol. 57, no. 36, Washington, D.C.





CAPÍTULO 3. PROCEDIMIENTO O MÉTODO

El presente estudio, tuvo por objeto evaluar el riesgo de incendio y/o explosión existente en una planta de hidrotreamiento de gasolina. Esto con el fin de generar información cuantitativa y confiable sobre esta problemática, misma que nos permitirá tomar decisiones que se traduzcan en mejoras de seguridad.

Tipo de investigación: de campo, observacional, transversal descriptiva y participativa.

Universo de estudio: Planta hidrotreamidora de gasolina

Tiempo de estudio: El total del trabajo de tesis fue desarrollado en un año y medio aproximadamente desde Enero de 2015 a Mayo de 2016.

Material y equipo: Laptop, Plano de Distribución de Equipos, Balances de materia y energía, Diagramas de tubería e instrumentos (DTI's), Software de evaluación de consecuencias Phast v.6.54.

Recursos humanos: Investigadores (tesista, director de tesis).

3.1 Método

Muchos peligros pueden ser identificados y controlados o eliminados mediante el uso de métodos de análisis de riesgos cualitativo. Los métodos cualitativos suelen identificar eventos potencialmente peligrosos y sus causas. En algunos casos, cuando los riesgos son claramente excesivos y las salvaguardas existentes son inadecuadas, acciones correctivas pueden ser identificadas de manera adecuada con los métodos cualitativos.

El análisis de riesgos cuantitativo (QRA), se utiliza para ayudar a evaluar los riesgos potenciales cuando los métodos cualitativos no pueden proporcionar una comprensión adecuada de los riesgos y se necesita más información para la gestión de riesgos. También se puede utilizar para evaluar estrategias alternativas de reducción de riesgos.

3.2 Análisis de Riesgo Cuantitativo (QRA)

El análisis cuantitativo del riesgo se basa en la aplicación de modelos matemáticos para determinar las consecuencias de escenarios de accidentes previamente identificados para predecir los efectos de accidentes (radiación térmica, sobrepresión, dosis) y modelos de vulnerabilidad y cálculo de las frecuencias correspondientes para estimar el riesgo resultante. El riesgo final se determina multiplicando las consecuencias por la frecuencia de los accidentes.

3.2.1 Etapas del Análisis de Riesgos Cuantitativo (QRA)

El análisis de riesgo cuantitativo, es un procedimiento sistemático que normalmente sigue una serie de pasos o etapas definidas. Cada uno de ellos se explica en detalle en esta sección. (Figura 14)

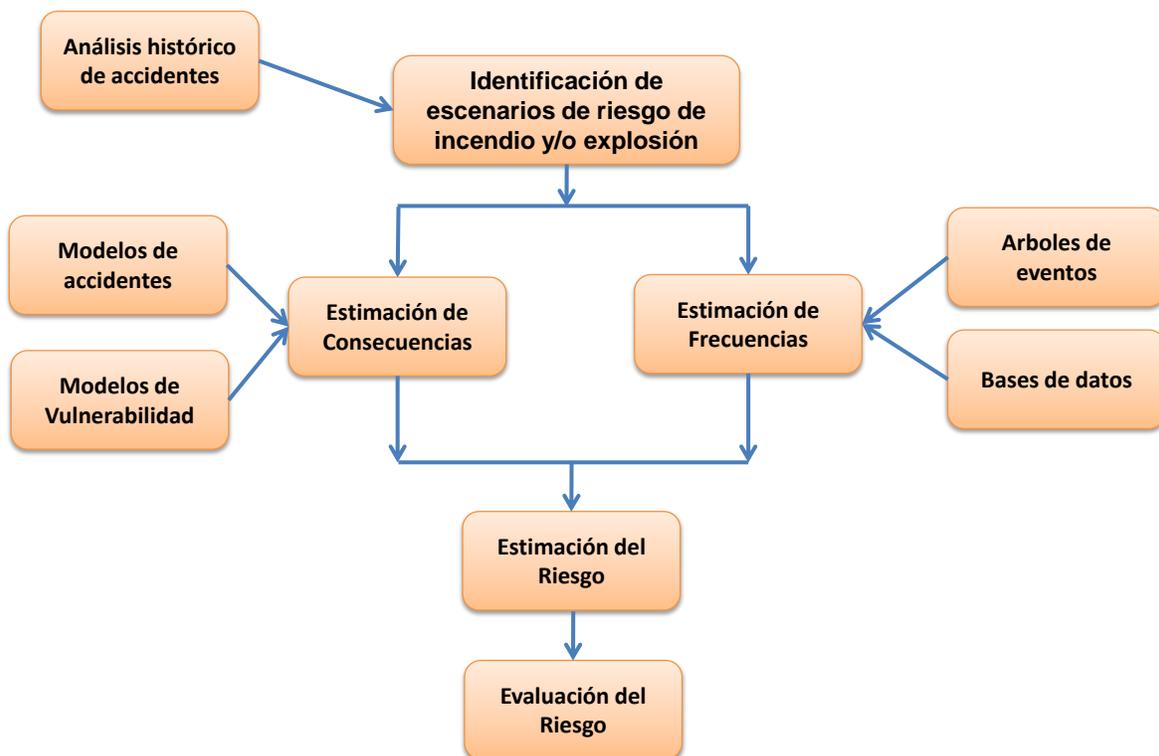


Figura 14 Metodología del análisis de riesgo cuantitativo.



3.2.2 Identificación de escenarios de riesgo de incendio y/o explosión

En esta etapa, se revisó y selecciono equipo en el que pueden producirse accidentes graves; por ejemplo, recipientes, bombas, reactores, tuberías principales, etc., de acuerdo con los criterios de condiciones de operación establecidos en el API 2218:

- Flujos mayores a 45 m³/h y
- Temperatura 8°C encima de su punto de inflamación.

Lo anterior fue realizado en combinación con el análisis histórico de accidentes, que es una técnica identificativa orientada a la búsqueda de información de accidentes industriales ocurridos en el pasado.

La técnica se basa en una recopilación de accidentes con productos químicos en forma de banco de datos donde se encuentra almacenada la información relativa a los mismos. La recogida sistemática de información relativa a diferentes accidentes ocurridos en el pasado en plantas químicas y actividades afines ha permitido, en algunos casos, la acumulación de datos concretos sobre una determinada situación, equipo u operación: carga o descarga de cisternas, transporte de mercancías peligrosas, procesos de fabricación de un producto determinado, parques de almacenamiento, vertido de líquidos inflamables, escape de un gas tóxico, etc.

3.2.3 Estimación de consecuencias

Posteriormente a la selección del equipo, se planteó un conjunto de eventos posibles de pérdida de contención, que se producen debido a un fallo del equipo o material; por ejemplo, diferentes diámetros de fuga por lo que se consideró liberación continua del producto en un plazo de tiempo específico.

La estimación de las consecuencias, es la metodología que se empleó para determinar el potencial de daños o lesiones por incidentes específicos.



Un solo incidente (por ejemplo, la rotura de un tanque de líquido inflamable a presión) puede tener muchos resultados distintos [por ejemplo, explosión nube de vapor no confinada (UVCE), explosión por expansión de vapor de líquido hirviendo (BLEVE), fuego tipo flash fire.

Estos eventos resultantes se analizaron mediante modelos de dispersión los cuales se modelaron considerando una estabilidad F y velocidad del viento de 1.5 m/s por ser las condiciones más adversas de dispersión de la fuente y modelos de explosión y fuego. Así como con Modelos de Vulnerabilidad que se emplean para determinar las consecuencias para las personas o estructuras.

Los escenarios seleccionados en el que se involucraron: equipo, tuberías o bridas de 6" a 14" se considerando un diámetro de fuga de 0.75" y 1.25" adicional, en el caso de equipos, tuberías y bridas de 16 a 24" se empleó un diámetro de fuga de 1.25" y un diámetro de fuga adicional de 2".

Se consideró un tiempo de 10 minutos (600 segundos) para cada diámetro de fuga seleccionado.

3.2.4 Estimación de frecuencias

Las estimaciones de frecuencia de ocurrencia de un incidente se obtuvieron a partir de datos de incidentes históricos y bases de datos sobre las frecuencias de falla, y de modelos de secuencia de fallas, tales como los árboles de eventos. La mayoría de los sistemas requieren la consideración de factores tales como fallas de causa común, un solo factor que conduce a fallos simultáneos de más de un sistema, por ejemplo, falta de energía eléctrica, la fiabilidad humana, y los acontecimientos externos.

Se aplicó la metodología de árboles de eventos para calcular las posibilidades de la ocurrencia de accidentes debido a la fuga en los diferentes escenarios.



Los datos de frecuencias de fuga se obtuvieron del reporte No. 437-1 de la OGP, (International Association of Oil & Gas Producers (OGP), (2010). Process release frequencies. Report No. 437-1) para estimar la frecuencia de fugas en la instalación de la planta hidrotratadora

3.2.5 Estimación del riesgo

La estimación de Riesgos se realizó mediante la combinación de las consecuencias y la frecuencia de todos los resultados de incidencia de todos los incidentes seleccionados para proporcionar una o más medidas de riesgo. Fue posible estimar un número de diferentes medidas de riesgo de un determinado conjunto de datos de frecuencia de incidentes y de consecuencia, y se proporciona una comprensión de estas medidas.

Los riesgos de todos los incidentes seleccionados se estimaron y se sumaron para dar una medida global del riesgo individual.

3.2.6 Evaluación del riesgo estimado

Es el proceso mediante el cual los resultados de un análisis de riesgos se utilizan para tomar decisiones, ya sea a través de la clasificación relativa de las estrategias de reducción de riesgos o por medio de la comparación con los objetivos específicos de riesgo.

Para este proyecto, se emplearon los criterios de tolerabilidad al riesgo en términos de ALARP, establecidos por Health and Safety Executive del reino unido, para determinar si el riesgo de la planta bajo estudio es aceptable o No. (Figura 15)

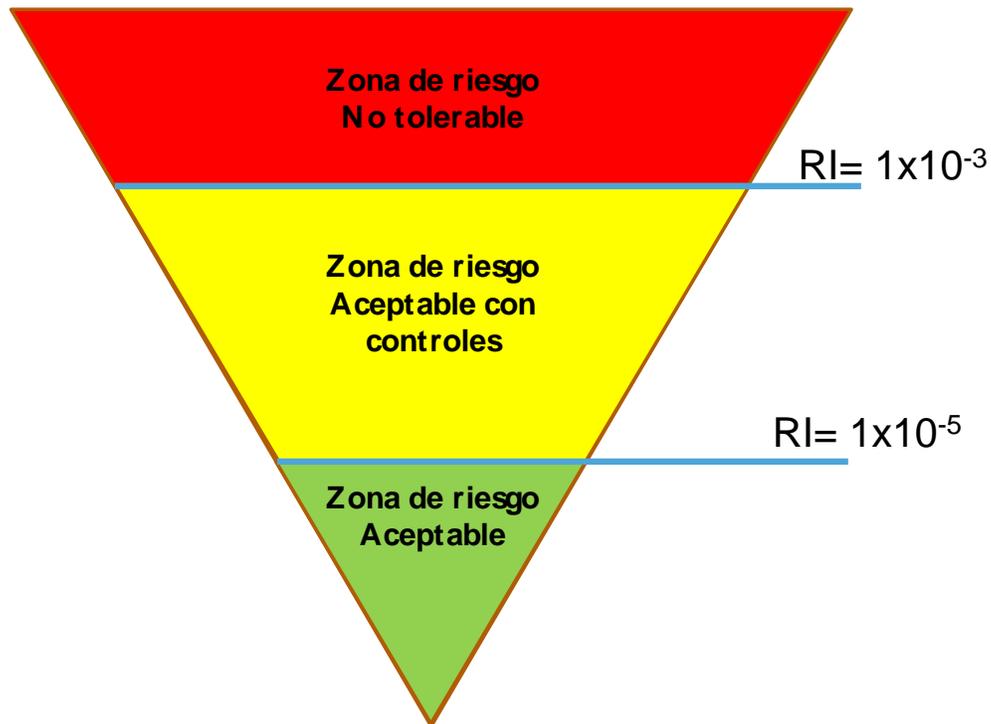


Figura 15 Tolerancia al riesgo





CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1 Escenarios de riesgo

Los escenarios de riesgo (perdida de contención), que han sido utilizados en este trabajo para desarrollar el análisis de riesgo cuantitativo (QRA), fueron seleccionados por medio de accidentes registrados en plantas similares, mediante la consulta de bases de datos, así como de los registros de accidentes de la propia empresa.

Los escenarios de riesgo se seleccionaron tomando en cuenta sus condiciones de operación (Presión y Temperatura altas) los cuales pueden tener una posible riesgo de incendio y o explosión, de acuerdo a los criterios del API 2218, Tabla 15.

Tabla 15 Escenarios de riesgo seleccionados.

No.	Localización	Escenario	Condiciones de Operación	Fase de descarga	Diámetro de fuga	Composición considerada en la simulación. (% mol)
1	Bomba de Circulación del rehervidor de Columna: GA-8202/S	Fuga de gasolina en Línea de descarga de 12"	Flujo=362256kg/h P= 24.1 kg/cm ² , T= 329.0 °C Densidad=530 kg/m ³	liquido	0.75" 1.25"	Heptano: 3.96 Octano: 29.2 Decano: 11.2 Undecano: 13.0 Dodecano: 10.5 Tridecano: 12.0 Tetradecano: 20.0
2	Reactor de Pulido: DC-8301	Fuga de gasolina en Línea de 16"	Flujo=178,811 kg/h P= 14.4 kg/cm ² , T= 266 °C Densidad=41.27 kg/m ³	vapor	1.25" 2.0"	Heptano: 56.0 Decano: 31.12 Hidrógeno: 11.34 Metano: 0.64 Etano: 0.52 Propano: 0.39
3	Bomba de Circulación de Fondos de la Estabilizadora de gasolina: GA-8303/S	Fuga de gasolina en Línea de descarga de 6"	Flujo=88635 kg/h P= 26.2kg/cm ² , T= 210 °C Densidad=578 kg/m ³	liquido	0.75" 1.25"	Heptano: 55.8 Octano: 23.4 Decano: 14.2 Undecano: 2.0 Dodecano: 0.3 Tridecano: 0.4 Tetradecano: 3.9
4	Bomba de Alimentación del Reactor de Pulido: GA-8204/S	Fuga de gasolina en Línea de descarga de 6"	Flujo= 89007 P= 18.6 kg/cm ² , T= 211 °C Densidad=578 kg/m ³	liquido	0.75" 1.25"	Hexano: 17.7 Heptano: 7.7 Octano: 65.6 Decano: 2.5 Undecano: 2.5 Dodecano: 2.0 Tridecano: 1.0 Tetradecano: 1.0
5	Compresor de Gas de Reciclo: GB-8201/S	Fuga de Hidrógeno en Línea de descarga de 6"	Flujo= 3281 kg/h P= 22.1 kg/cm ² , T= 148 °C Densidad= 4.76 kg/m ³	vapor	0.75" 1.25"	Hidrógeno: 75.63 Metano: 17.51 Etano: 4.14 Propano: 0.97 H2S: 0.03 Hexano: 1.6 Heptano: 0.1 Octano: 0.02



4.2 Resultado del estimado de consecuencias

Para los efectos que se expresan en la Tabla 16, la afectación sobre las personas por radiación, se complementó con los datos del nivel de exposición por sobre presión a partir de la hoja de datos “*Vulnerability of humans*” publicada en 2010 por la Asociación Internacional de Productores de Gas y Petróleo, y los métodos de aproximación y determinación de vulnerabilidad humana publicado por la Health and Safety Executive.

Tabla 16 Niveles de sobrepresión y radiación que afectan a las personas

	Nivel Exposición	Efectos en personas	Efectos en materiales
Radiación Térmica kW/m²	37.5	100% de letalidad en 1min. 1% de letalidad en 10s.	Daño a equipos
	25	100% letalidad en 1min. Serias lesiones en 10s.	Mínima intensidad para ignición de madera en exposición prolongada
	12.5	1% de letalidad en 1min. Quemaduras 1er grado en 10s.	Mínima intensidad para ignición, y fundición de tubería plástica.
	4	No hay letalidad Probables quemaduras de 2do grado Dolor después de 20s. de exposición	
	1.6	Limite aceptado para exposición prolongada.	
Sobrepresión Lb/in²	10.0	100% de letalidad para personas en espacio abierto.	Probable destrucción total de edificios.
	7.25	50% de letalidad para personas en espacio abierto. 100% de letalidad para personas en exteriores adyacentes a edificios o estructuras no protegidas.	Volcado de carros de ferrocarril; muros de ladrillo de 8 a 12 pulgadas de espesor y no reforzados fallan
	5.0	15% de letalidad para personas en espacio abierto. 30% de letalidad para personas en exteriores adyacentes a edificios o estructuras no protegidas.	Desprendimiento de postes de madera de energía eléctrica; prensas hidráulicas (18.2 toneladas) dentro de edificios ligeramente dañadas
	3	20% probabilidad de letalidad para personas en interiores 0% probabilidad de letalidad para personas en espacio abierto	Maquinaria industrial pesada (1.5 ton) sufre daños menores; estructuras de acero de edificios se distorsionan y son arrancados de su base.
	0.3	Distancia segura (95% de probabilidad de no sufrir daños) 10% de ruptura de ventanas	



4.2.1 Resultados de cálculo de explosiones

Tabla 17 Resultados de sobrepresión

Escenario evaluados											
Escenario	Equipo	Escenario	Condiciones de operación		Inventario (kg)	Ø De Fuga (in)	Sobrepresión				
			P (kg/cm ²)	T (°C)			centro de explosión	Distancia de afectación a 7.0 psi (m)	Distancia de afectación a 5.0 psi (m)	Distancia de afectación a 3.0 psi (m)	Distancia de afectación a 0.3 psi (m)
1	GA-8202/S	Fuga de gasolina línea de descarga	24.1	329	5,748	0.75	50	52	53	54	73
2	DC-8301	Fuga de gasolina línea efluente reactor de pulido	14.4	266	1,824	1.25	28	29	30	31	37
3	GA-8303/S	Fuga de gasolina línea de descarga	20	210	5472	0.75	50	51	52	53	70
4	GA-8204/S	Fuga de nafta en línea de descarga	15.1	209	4752	0.75	35	36	37	38	52
5	GB-8201/S	Fuga de hidrógeno en línea de descarga	22.1	148	573.6	0.75	20	21	22	23	28



Tabla 18 Resultados de sobrepresión

Escenario evaluados											
Escenario	Equipo	Escenario	Condiciones de operación		Inventario (kg)	Ø De Fuga (in)	Sobrepresión				
			P (kg/cm ²)	T (°C)			centro de explosión	Distancia de afectación a 7.0 psi (m)	Distancia de afectación a 5.0 psi (m)	Distancia de afectación a 3.0 psi (m)	Distancia de afectación a 0.3 psi (m)
6	GA-8202/S	Fuga de gasolina línea de descarga	24.1	329	13,008	1.25	53	56	57	58	86
7	DC-8301	Fuga de gasolina línea efluente reactor de pulido	14.4	266	23,685	2	30	32	33	34	57
8	GA-8303/S	Fuga de gasolina línea de descarga	20	210	12378	1.25	50	52	53	55	80
9	GA-8204/S	Fuga de nafta en línea de descarga	15.1	209	10752	1.25	35	37	38	39	57
10	GB-8201/S	Fuga de hidrógeno en línea de descarga	22.1	148	1296	1.25	40	41	42	42.5	55



4.2.2 Resultados del cálculo de radiación por incendio

Tabla 19 Resultados de Radiación térmica

Escenario evaluados									
Escenario	Equipo	Escenario	Condiciones de operación		Inventario (kg)	Ø De Fuga (in)	Radiación		
			P (kg/cm ²)	T (°C)			Distancia de afectación 37.5 kw/m ² (m)	Distancia de afectación 12.5 kw/m ² (m)	Distancia de afectación 4 kw/m ² (m)
1	GA-8202/S	Fuga de gasolina línea de descarga	24.1	329	5,748	0.75	31	42	60
2	DC-8301	Fuga de gasolina línea efluente reactor de pulido	14.4	266	1,824	1.25	19	24	31
3	GA-8303/S	Fuga de gasolina línea de descarga	20	210	5472	0.75	41	50	65
4	GA-8204/S	Fuga de nafta en línea de descarga	15.1	209	4752	0.75	38	47	60
5	GB-8201/S	Fuga de hidrógeno en línea de descarga	22.1	148	573.6	0.75	10	15	19



Tabla 20 Resultados de Radiación térmica

Escenario evaluados									
Escenario	Equipo	Escenario	Condiciones de operación		Inventario (kg)	Ø De Fuga (in)	Radiación		
			P (kg/cm ²)	T (°C)			Distancia de afectación 37.5 kw/m ² (m)	Distancia de afectación 12.5 kw/m ² (m)	Distancia de afectación 4 kw/m ² (m)
6	GA-8202/S	Fuga de gasolina línea de descarga	24.1	329	13,008	1.25	44.5	62	83
7	DC-8301	Fuga de gasolina línea efluente reactor de pulido	14.4	266	23,685	2	57	77	107
8	GA-8303/S	Fuga de gasolina línea de descarga	20	210	12378	1.25	59	72	91
9	GA-8204/S	Fuga de nafta en línea de descarga	15.1	209	10752	1.25	56	67	88
10	GB-8201/S	Fuga de hidrógeno en línea de descarga	22.1	148	1296	1.25	18	23	29

4.2.3 Gráficas de sobre presión y radiación

Escenario 1 Diámetro de fuga 0.75” Bomba de recirculación de fondos GA-8202/S. De la Columna de destilación.

Sobrepresión		
Fuga	Inventario Kg	Distancia segura (m)
Gasolina en Línea de descarga de 12” de la Bomba GA-8202/S	5748	73

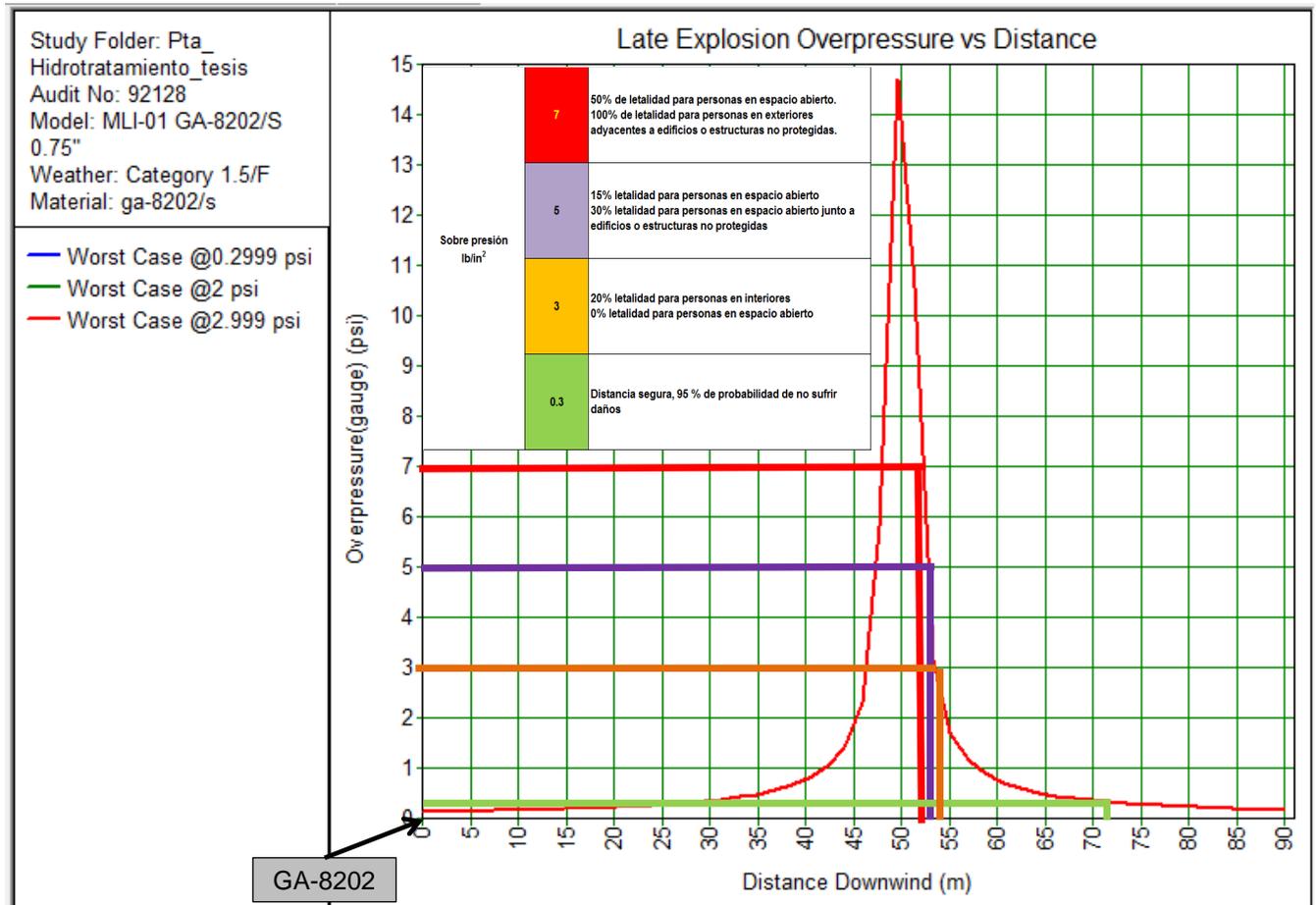


Figura 16 Gráfica sobrepresión escenario 1

Radiación		
Fuga	Inventario Kg	Distancia segura (m)
Gasolina en Línea de descarga de 12" de la Bomba GA-8202/S	5748	60

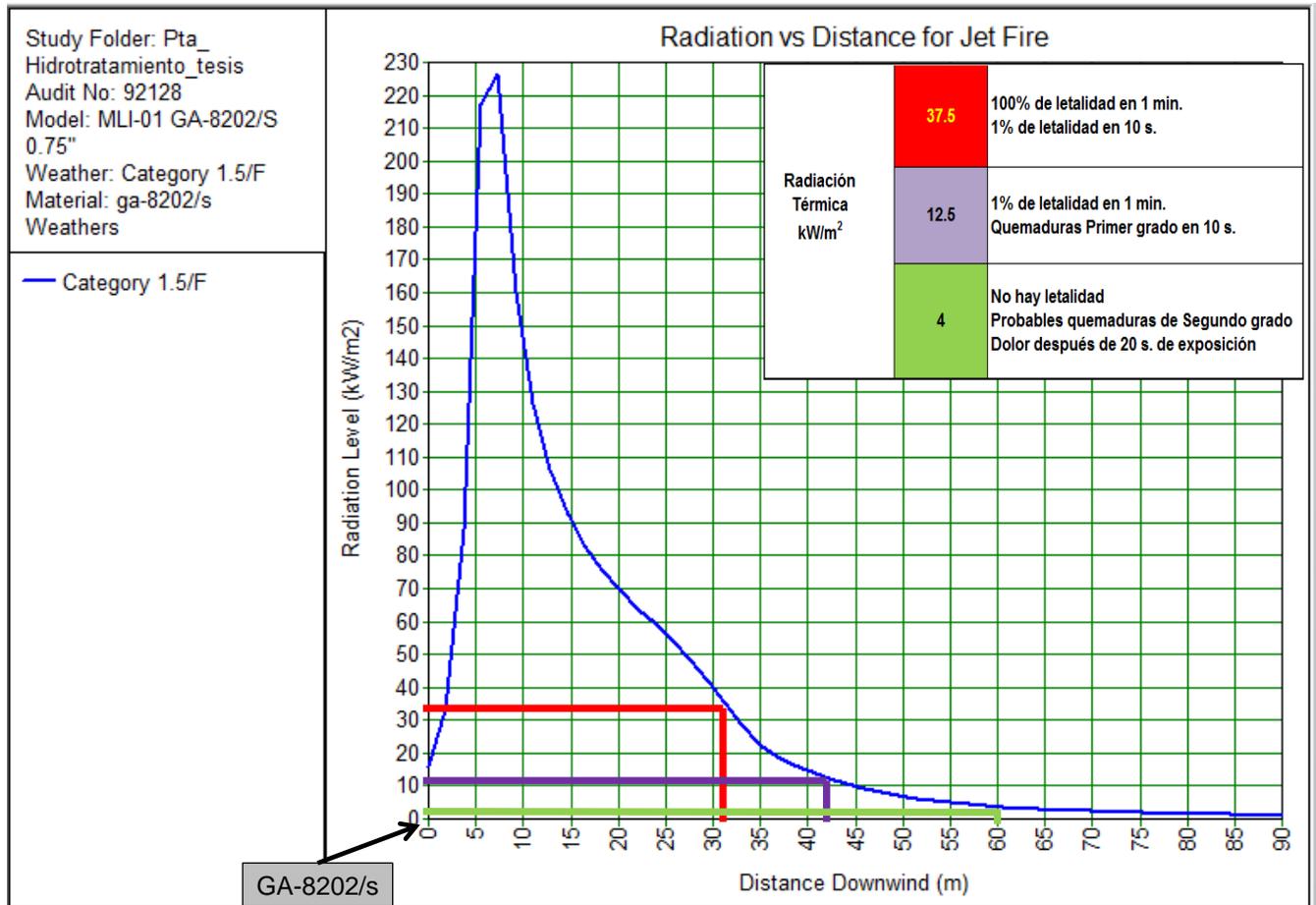


Figura 17 Gráfica radiación escenario 1

Escenario 2 Diámetro de fuga 1.25” línea de efluente Reactor DC-8301.

Sobrepresión		
Fuga	Inventario Kg	Distancia segura (m)
Gasolina en Línea de efluente de 16” Del Reactor de DC-8301	1824	37

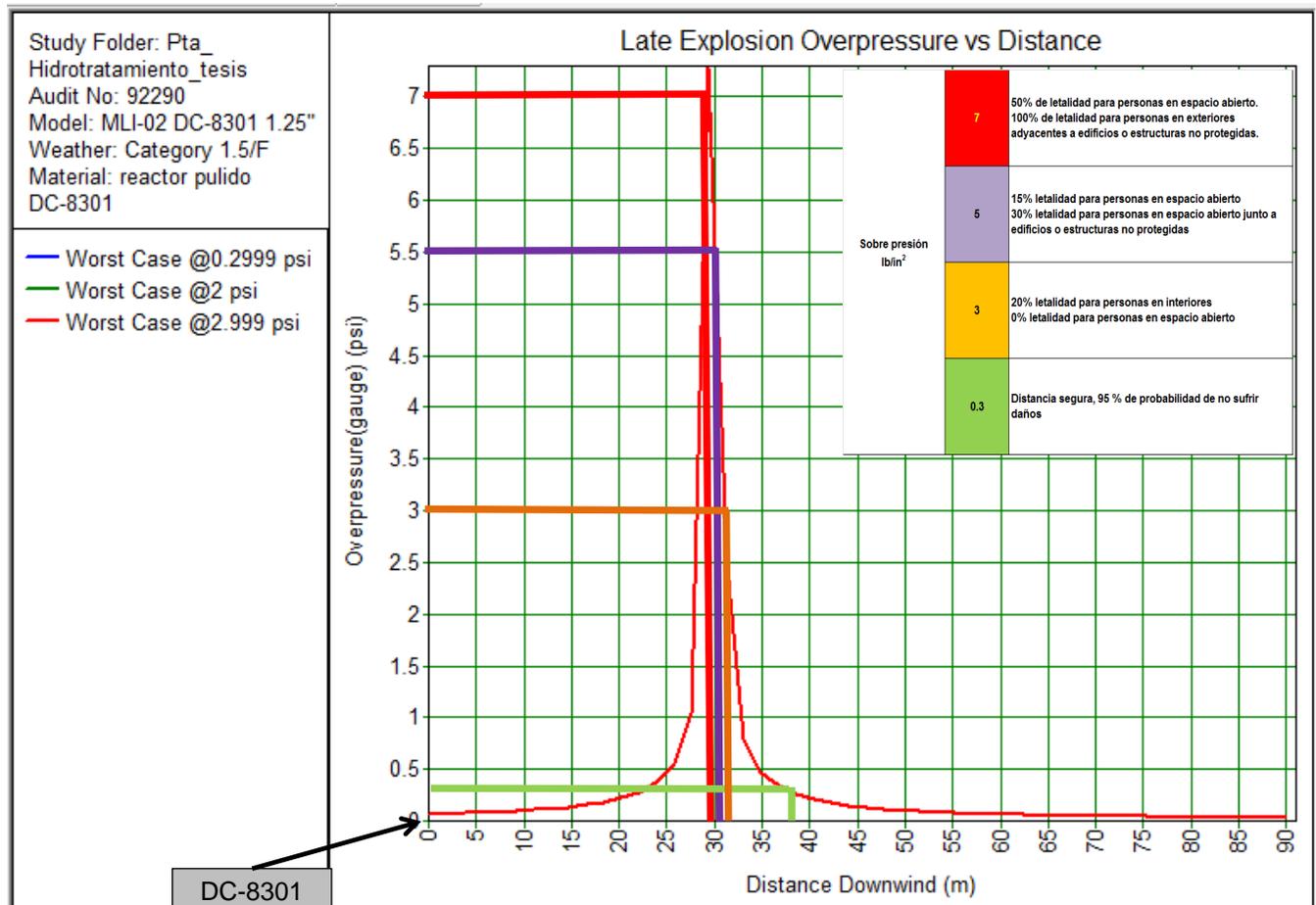


Figura 18 Gráfica sobrepresión escenario 2

Radiación		
Fuga	Inventario Kg	Distancia segura (m)
Gasolina en Línea de efluente de 16" Del Reactor de DC-8301	1824	31

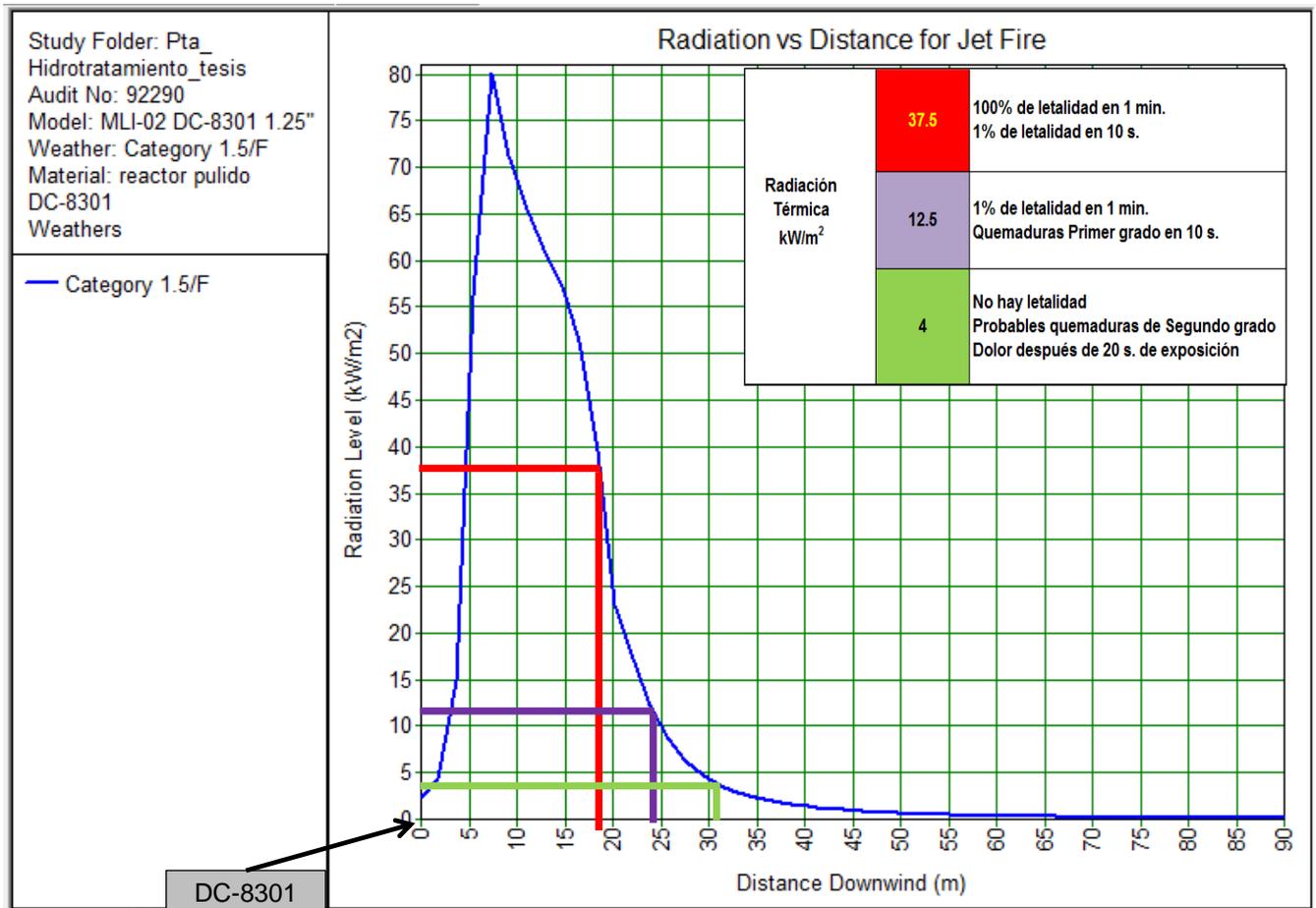


Figura 19 Gráfica radiación escenario 2

Escenario 3 Diámetro de fuga 0.75” Bomba de recirculación de fondos GA-8303/S. de la columna Estabilizadora de gasolina

Sobrepresión		
Fuga	Inventario Kg	Distancia segura (m)
Gasolina en Línea 6” de descarga de la Bomba de recirculación: GA-8303/S	5472	70

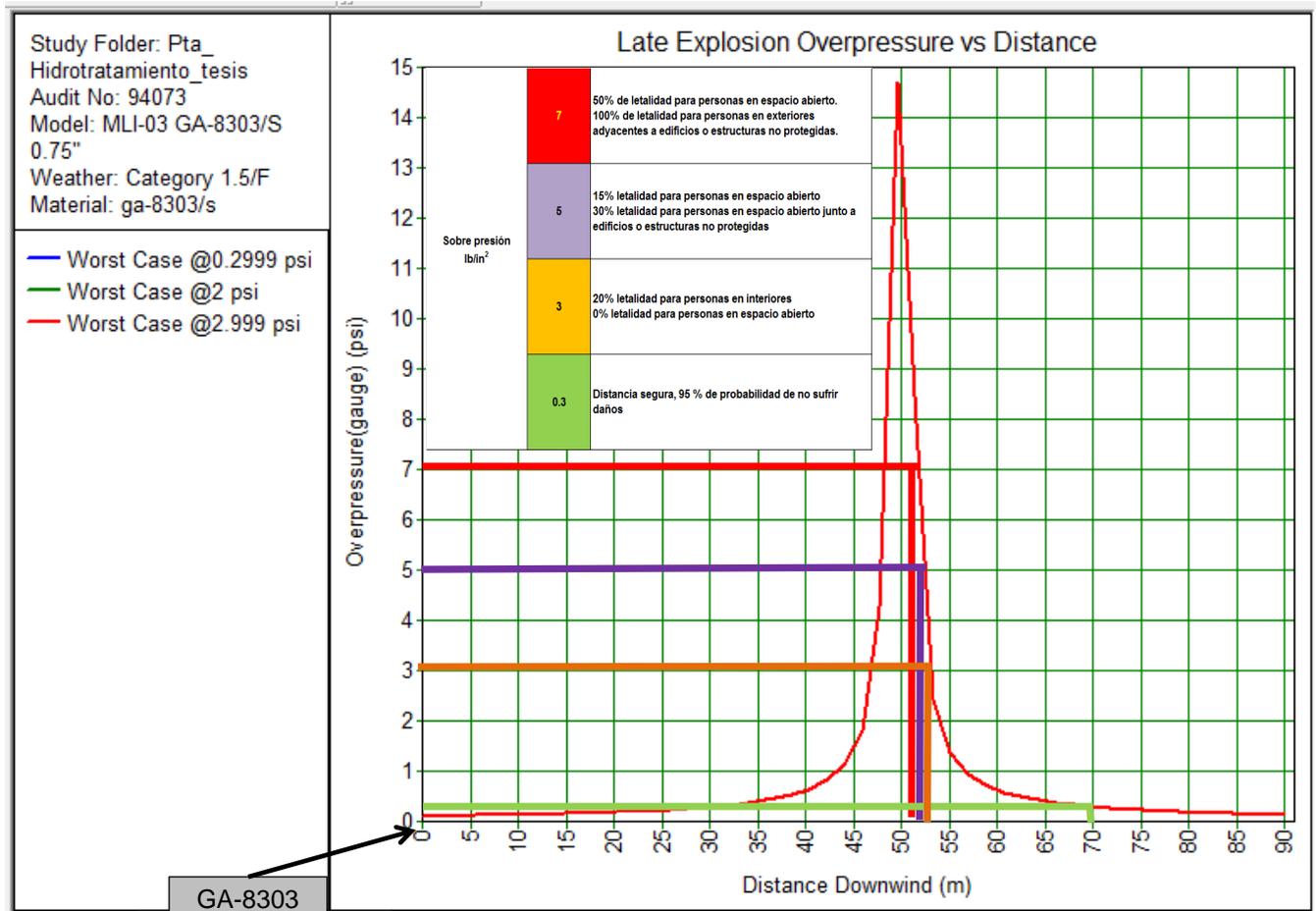


Figura 20 Gráfica sobrepresión escenario 3

Radiación		
Fuga	Inventario Kg	Distancia segura (m)
Nafta en Línea de descarga de 6"-P-830028-B1D-H Bomba de Circulación: GA-8303/S	5472	65

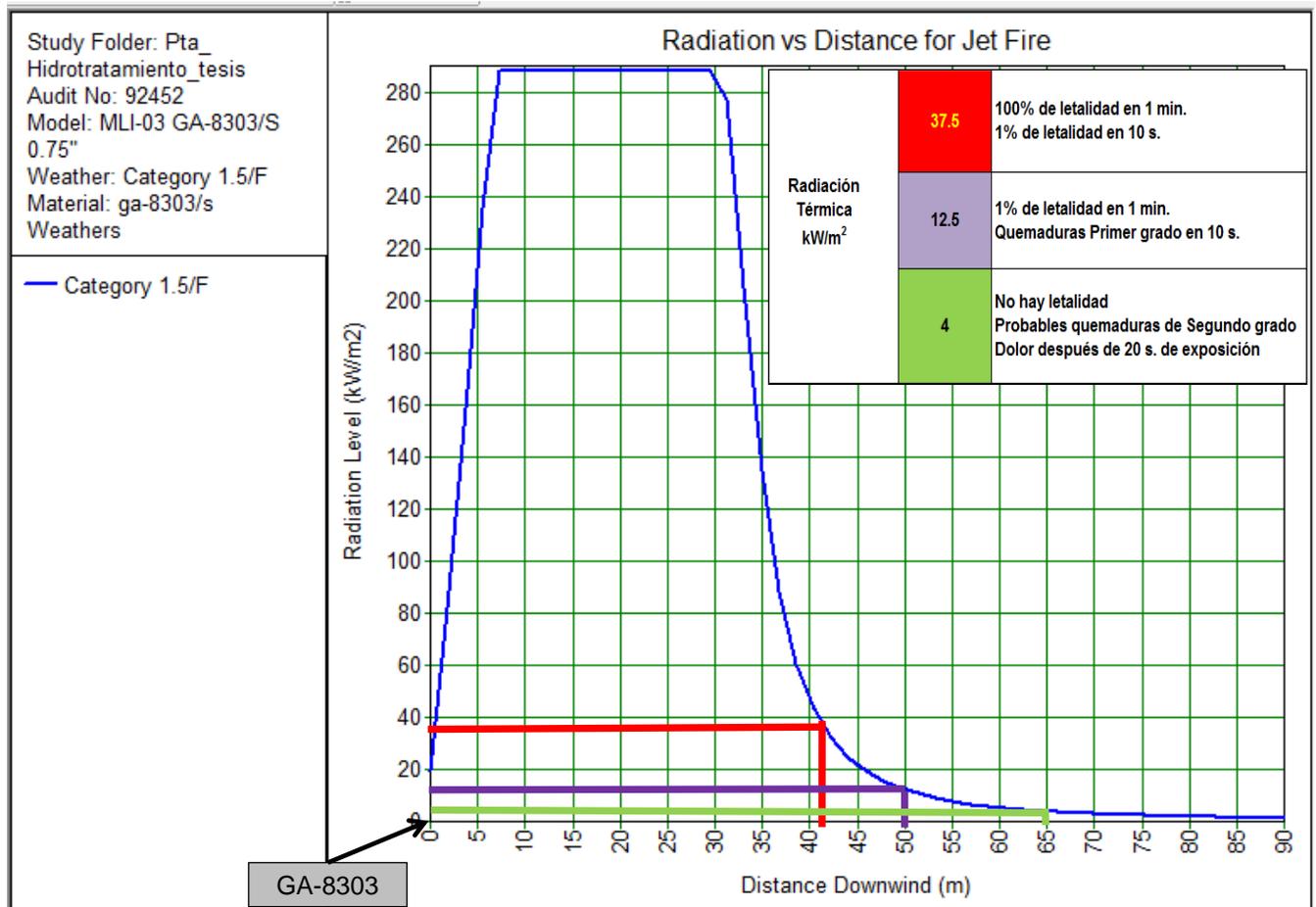


Figura 21 Gráfica radiación escenario 3

Escenario 4 Diámetro de fuga 0.75” Bomba de Alimentación Reactor de Pulido: GA-8204/S.

Sobrepresión		
Fuga	Inventario Kg	Distancia segura (m)
Gasolina en línea de 6” de descarga de de la Bomba GA-8204/S	4752	52

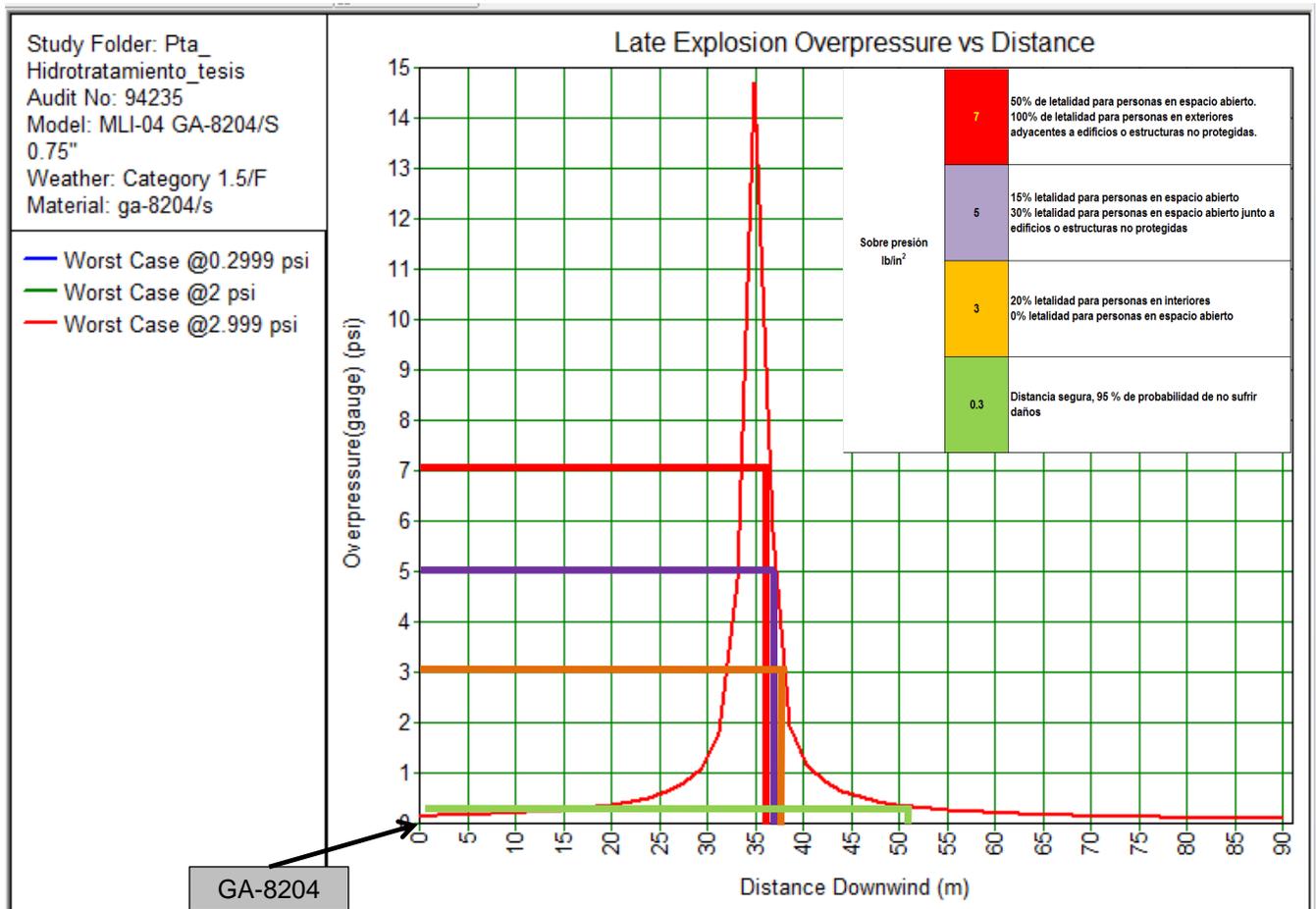


Figura 22 Gráfica de sobrepresión escenario 4

Radiación		
Fuga	Inventario Kg	Distancia segura (m)
Gasolina en línea de 6" de descarga de la Bomba GA-8204/S	4752	60

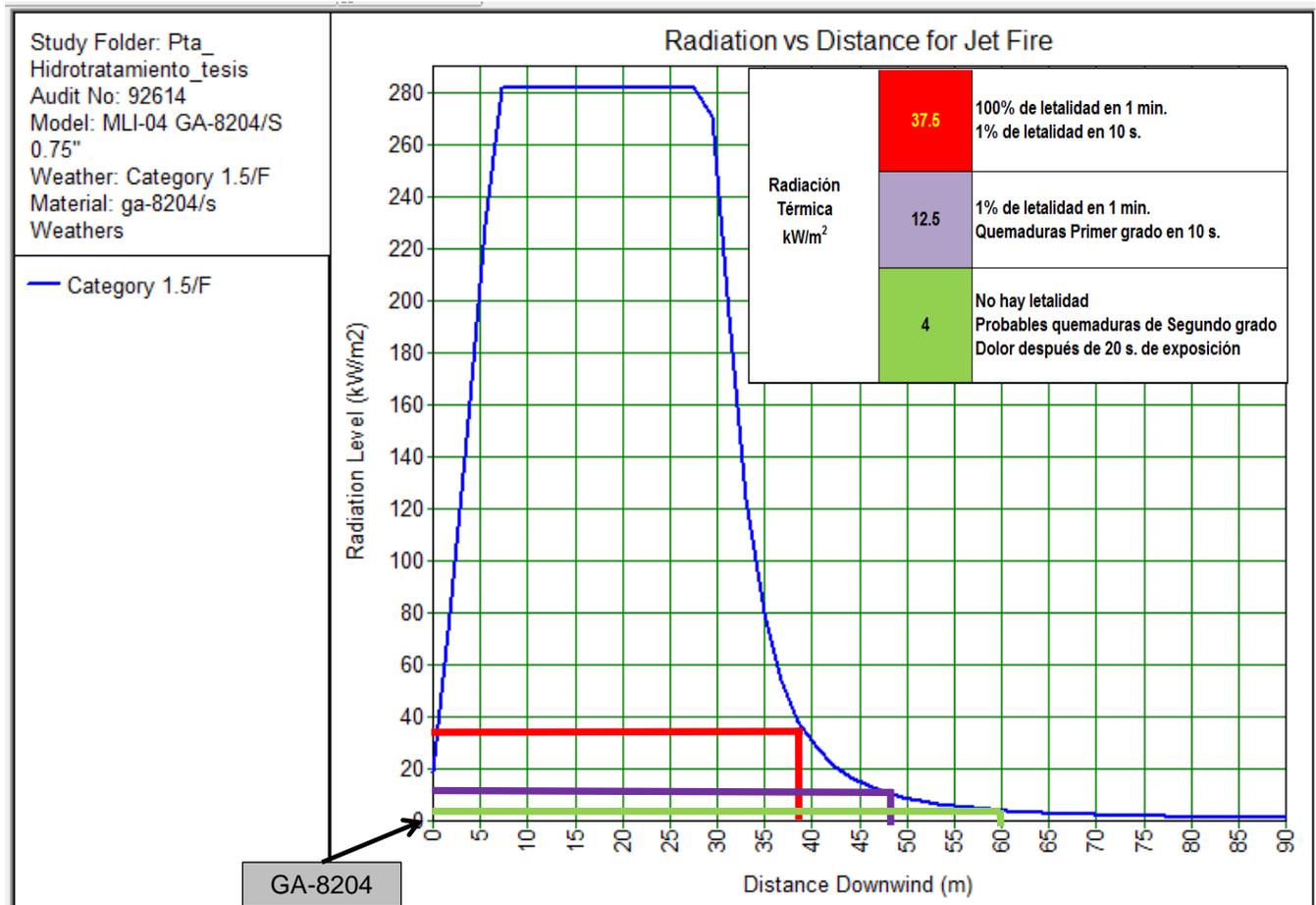


Figura 23 Gráfica de radiación escenario 4

Escenario 5 Diámetro de fuga 0.75” Compresor de Gas de Reciclo: GB-8201S.

Sobrepresión		
Fuga	Inventario Kg	Distancia segura (m)
Fuga de Hidrógeno en Línea de descarga de 6”del Compresor: GB-8201S	573.6	28

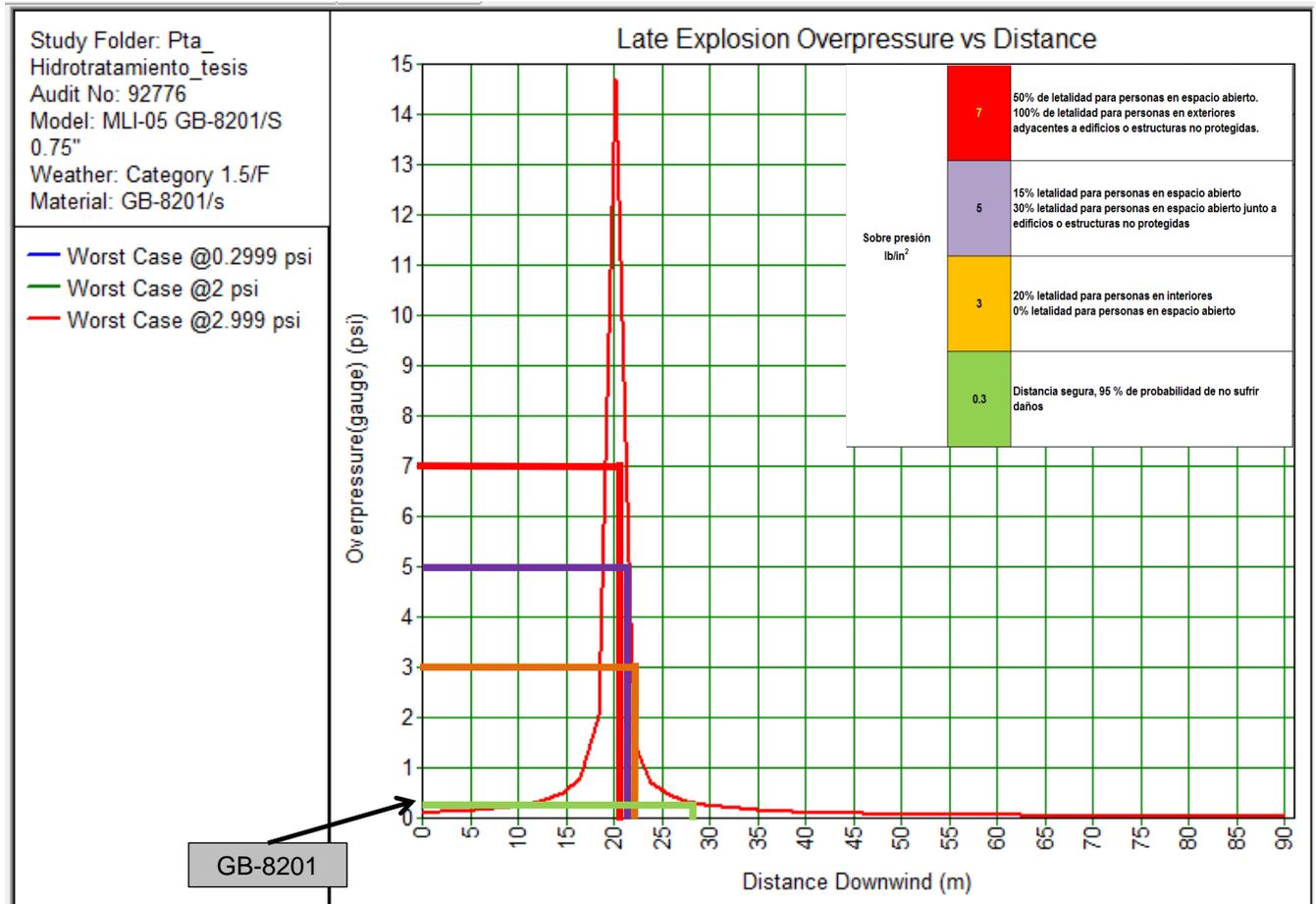


Figura 24 Gráfica de sobrepresión escenario 5

Radiación		
Fuga	Inventario Kg	Distancia segura (m)
Fuga de Hidrógeno en Línea de descarga de 6" del Compresor: GB-8201S	573.6	19

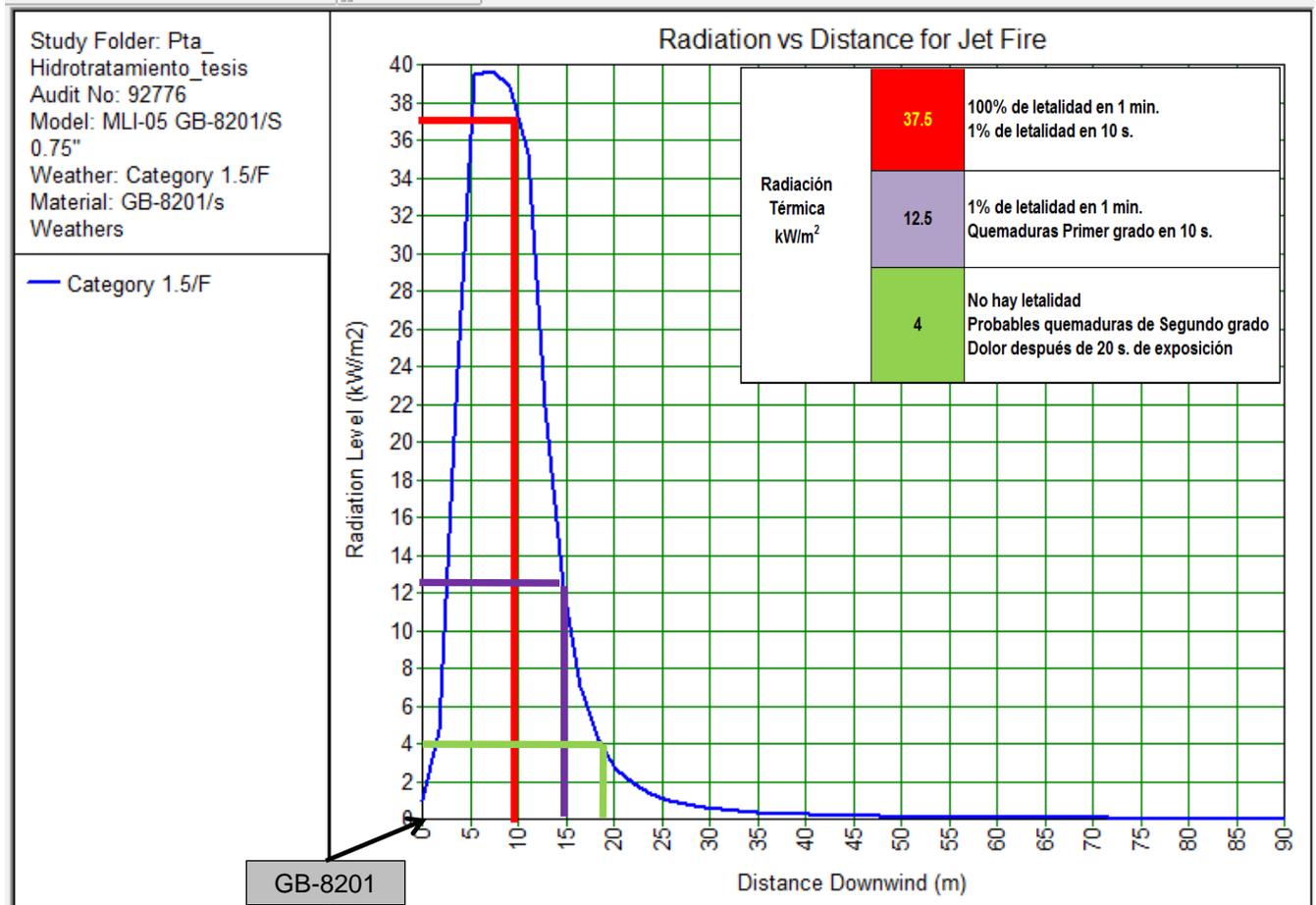


Figura 25 Gráfica de radiación escenario 5

Escenario 6 Diámetro de fuga 1.25” Bomba de recirculación de fondos GA-8202/S. De la Columna de destilación.

Sobrepresión		
Fuga	Inventario Kg	Distancia segura (m)
Gasolina en Línea de descarga de 12” de la Bomba: GA-8202/S	13008	86

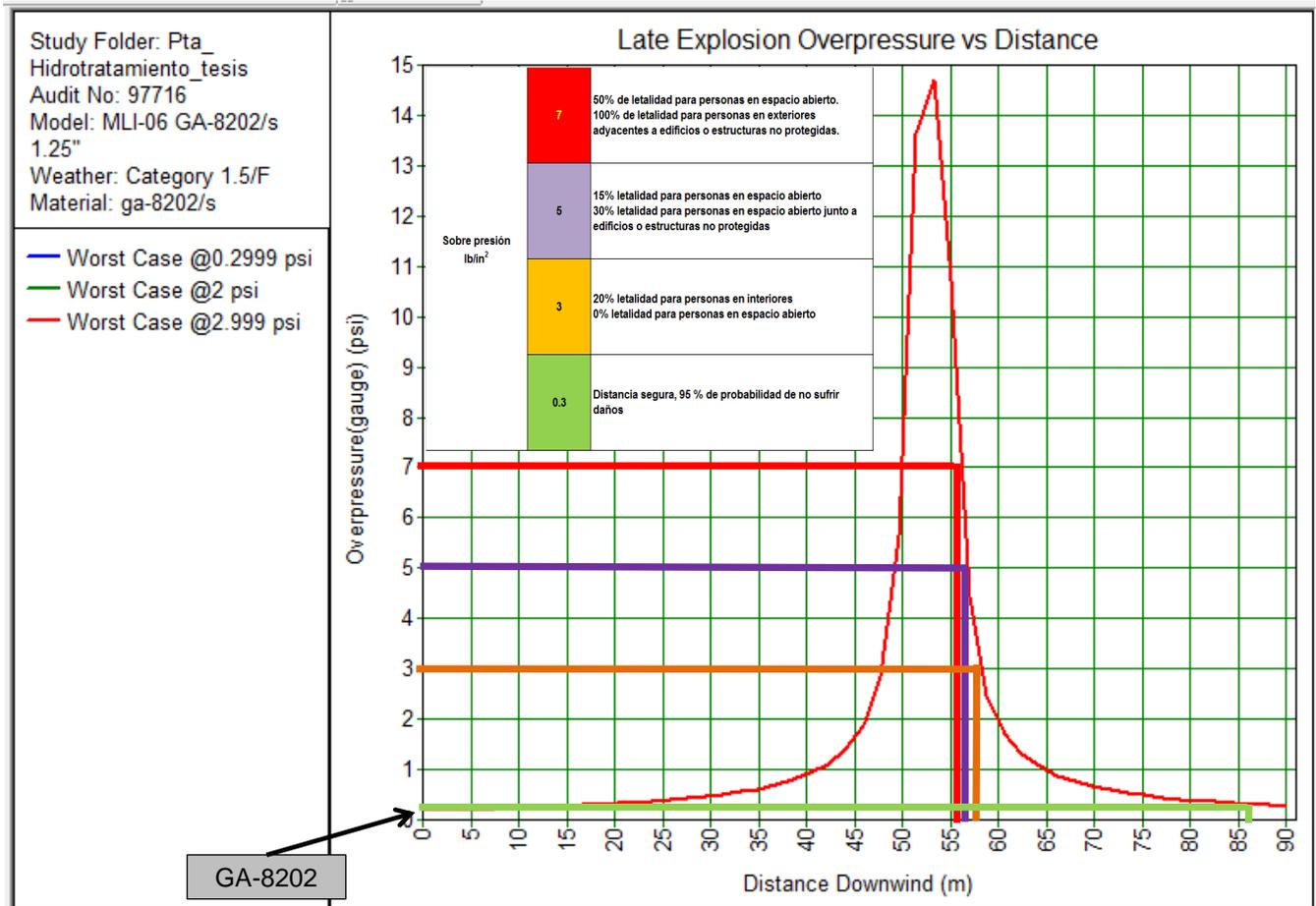


Figura 26 Gráfica sobrepresión escenario 6

Radiación		
Fuga	Inventario fuga Kg	Distancia segura (m)
Gasolina en Línea de descarga de 12" de la Bomba GA-8202/S	13008	83

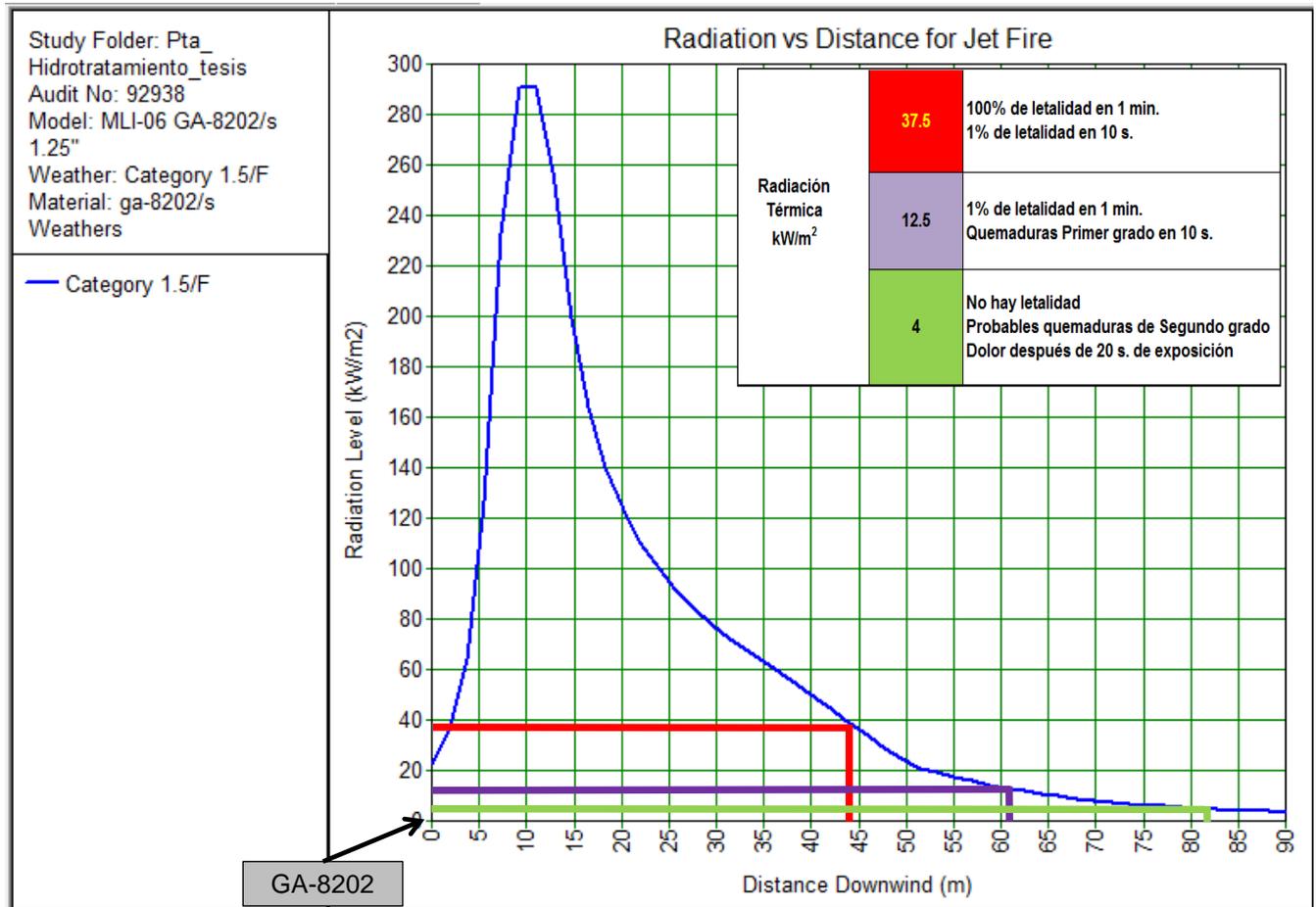


Figura 27 Gráfica radiación escenario 6

Escenario 7 Diámetro de fuga 2.0” línea de efluente Reactor de Pulido DC-8301.

Sobrepresión		
Fuga	Inventario Kg	Distancia segura (m)
Gasolina en Línea de efluente de 16” Del Reactor de DC-8301	23685	57

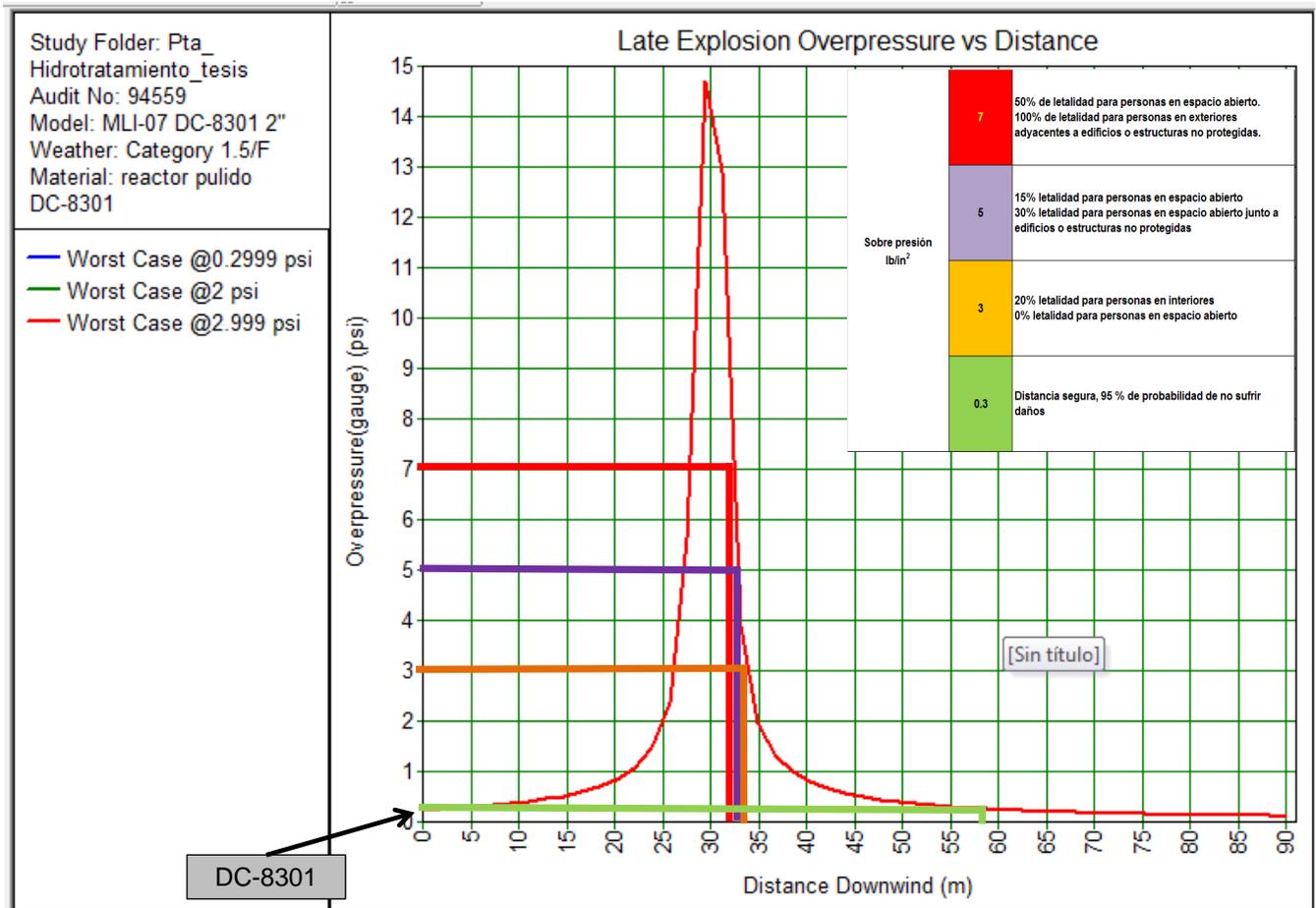


Figura 28 Gráfica sobrepresión escenario 7

Radiación		
Fuga	Inventario Kg	Distancia segura (m)
Gasolina en Línea de efluente de 16" Del Reactor de DC-8301	23685	107

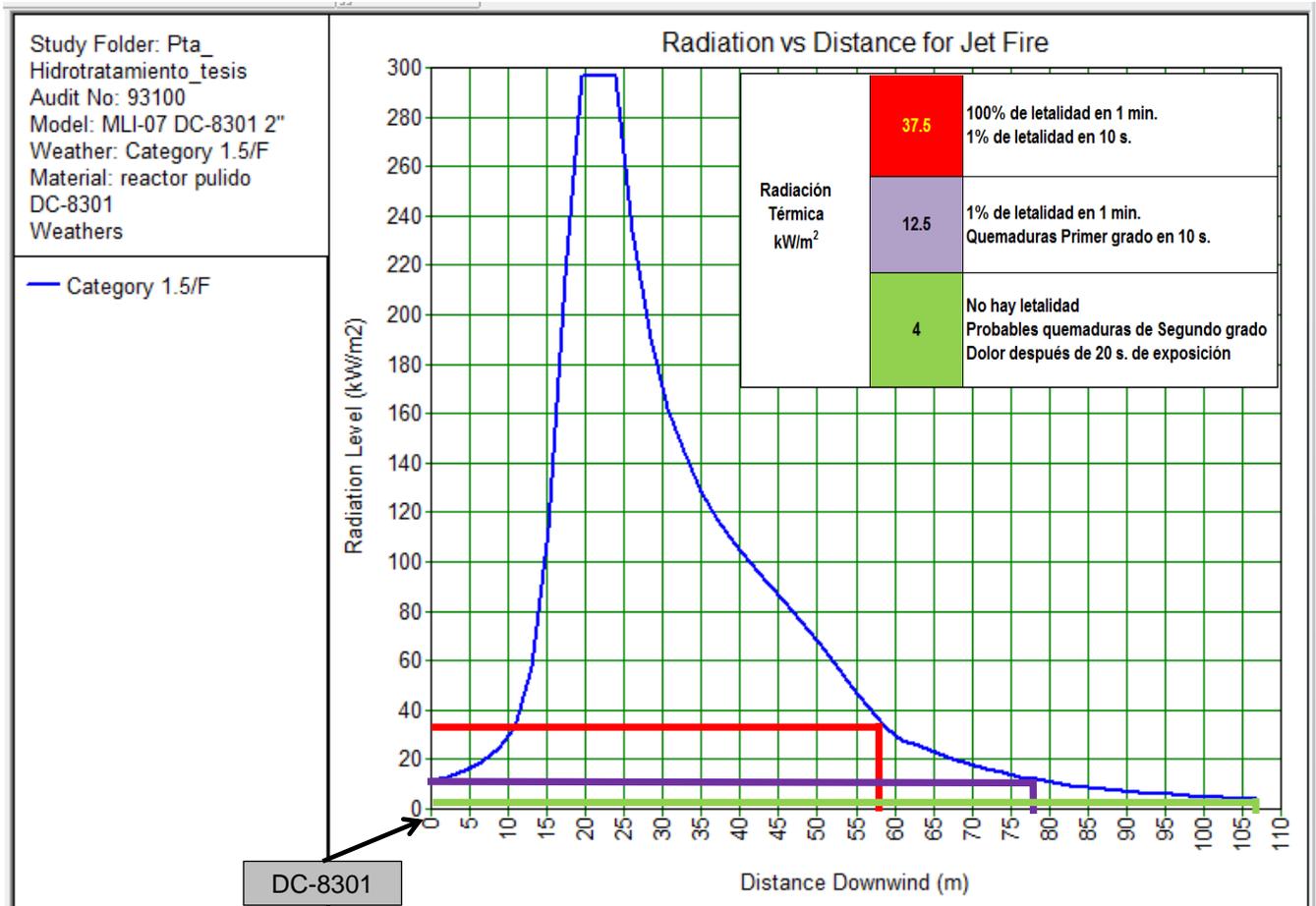


Figura 29 Gráfica radiación escenario 7

Escenario 8 Diámetro de fuga 1.25” Bomba de recirculación de fondos GA-8303/S. de la columna Estabilizadora de gasolina

Sobrepresión		
Fuga	Inventario Kg	Distancia segura (m)
Gasolina en Línea 6” de descarga de la Bomba de recirculación: GA-8303/S	12378	80

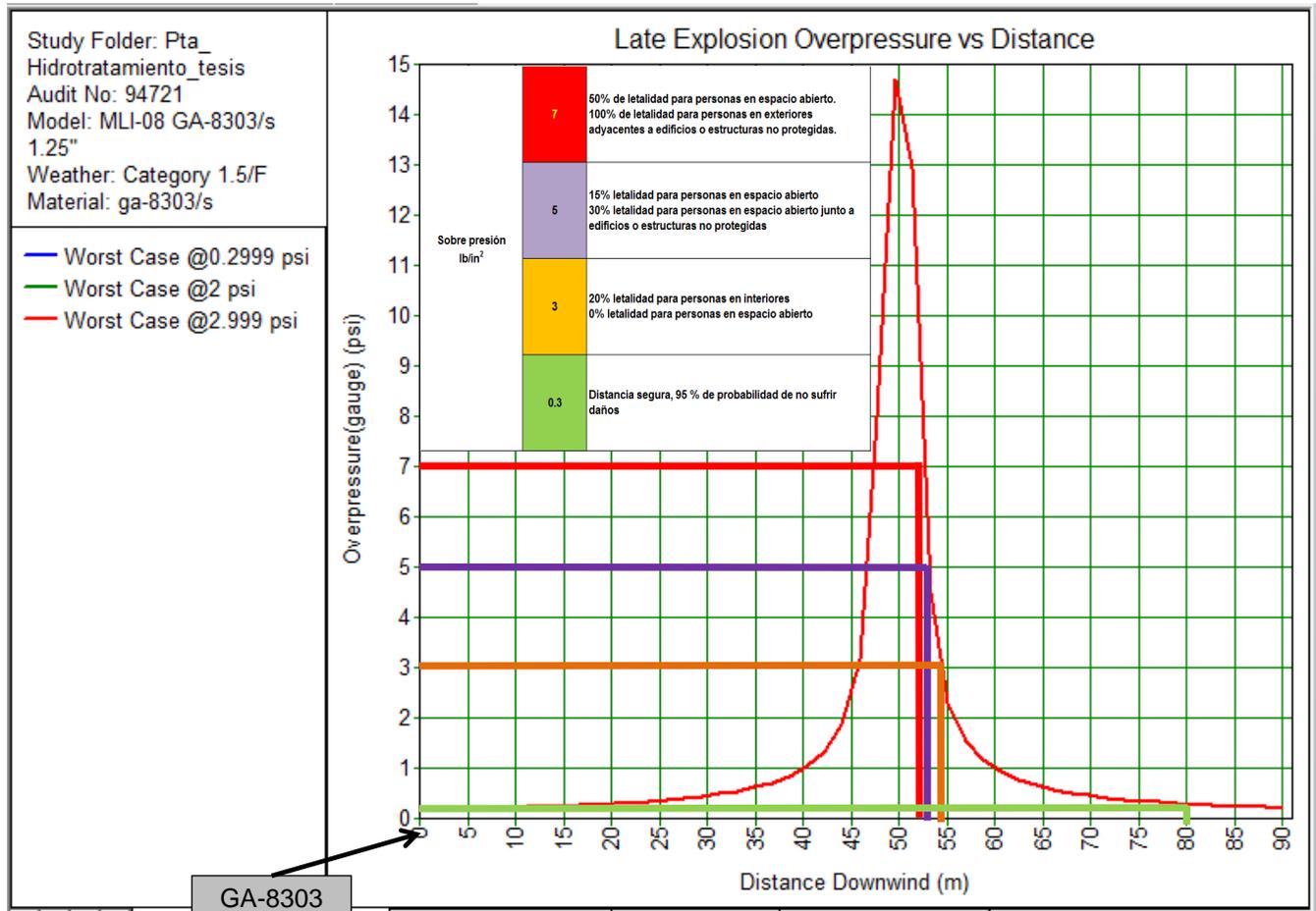


Figura 30 Gráfica de sobrepresión escenario 8

Radiación		
Fuga	Inventario Kg	Distancia segura (m)
Gasolina en Línea 6" de descarga de la Bomba de recirculación: GA-8303/S	12378	91

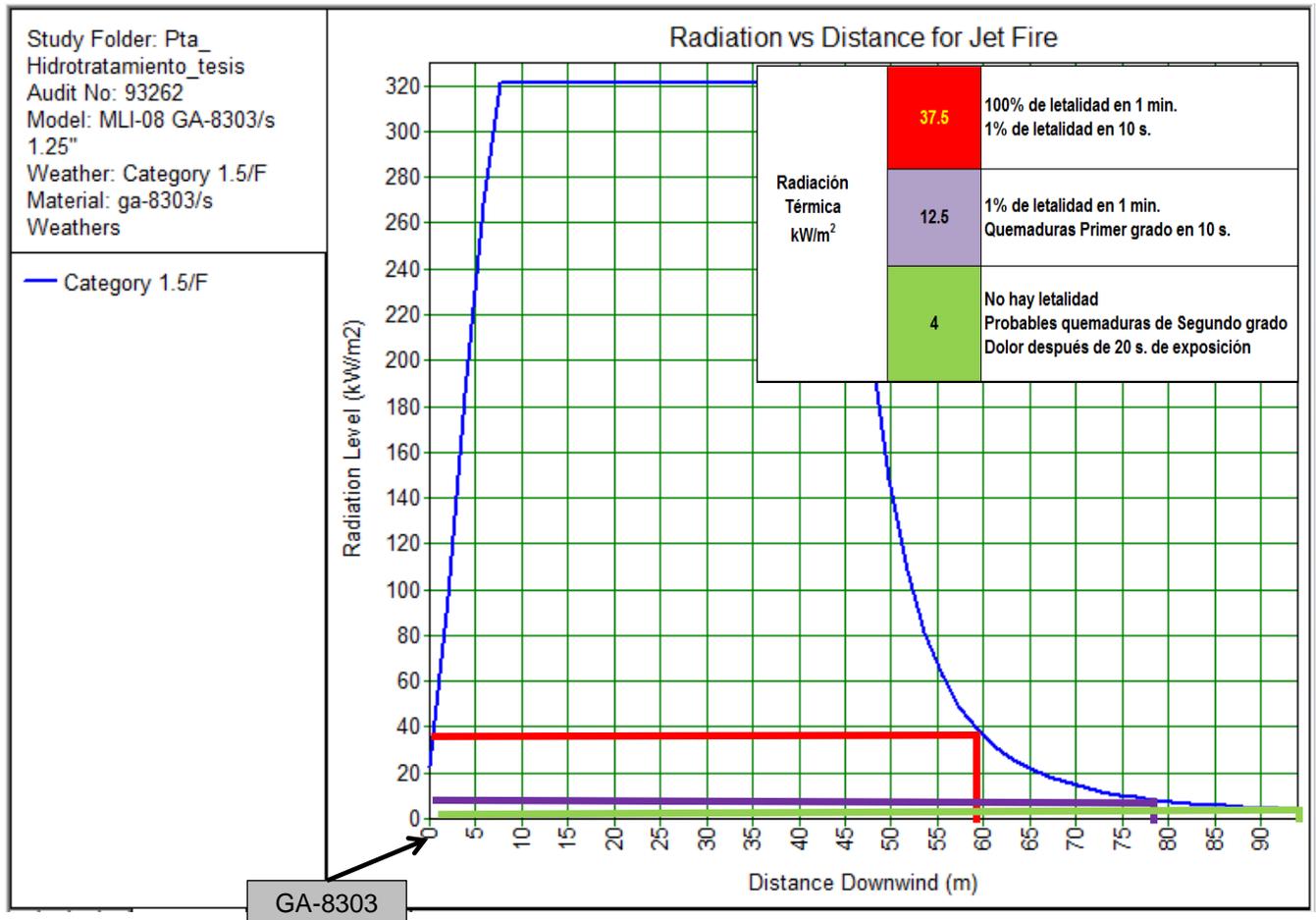


Figura 31 Gráfica de radiación escenario 8

Escenario 9 Diámetro de fuga 1.25” Bomba de Alimentación Reactor de Pulido: GA-8204/S.

Sobrepresión		
Fuga	Inventario Kg	Distancia segura (m)
Gasolina en línea de descarga de 6” de la Bomba: GA-8204/S	10752	57

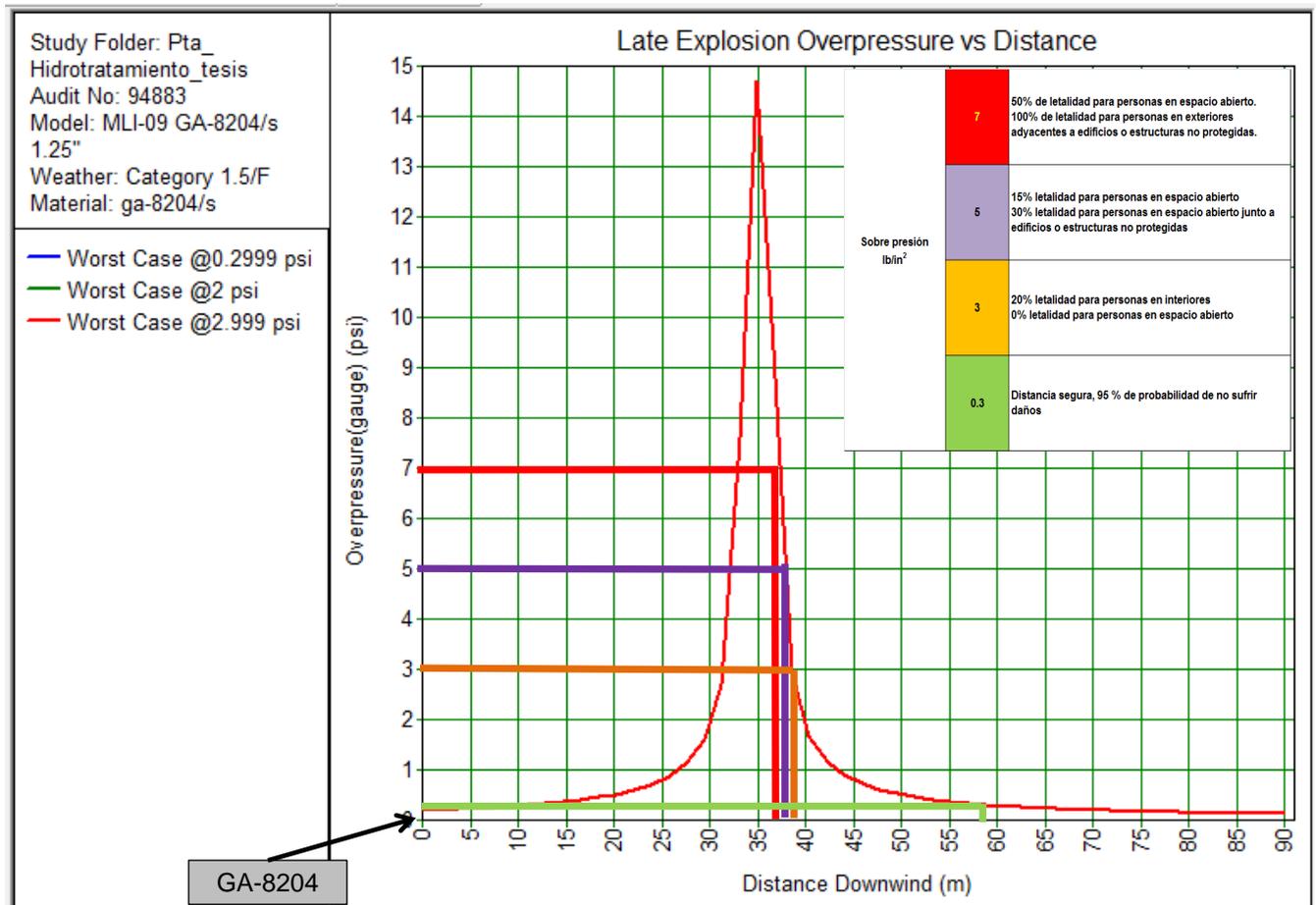


Figura 32 Gráfica de sobrepresión escenario 9

Radiación		
Fuga	Inventario Kg	Distancia segura (m)
Gasolina en línea de 6" de descarga de de la Bomba GA-8204/S	10752	88

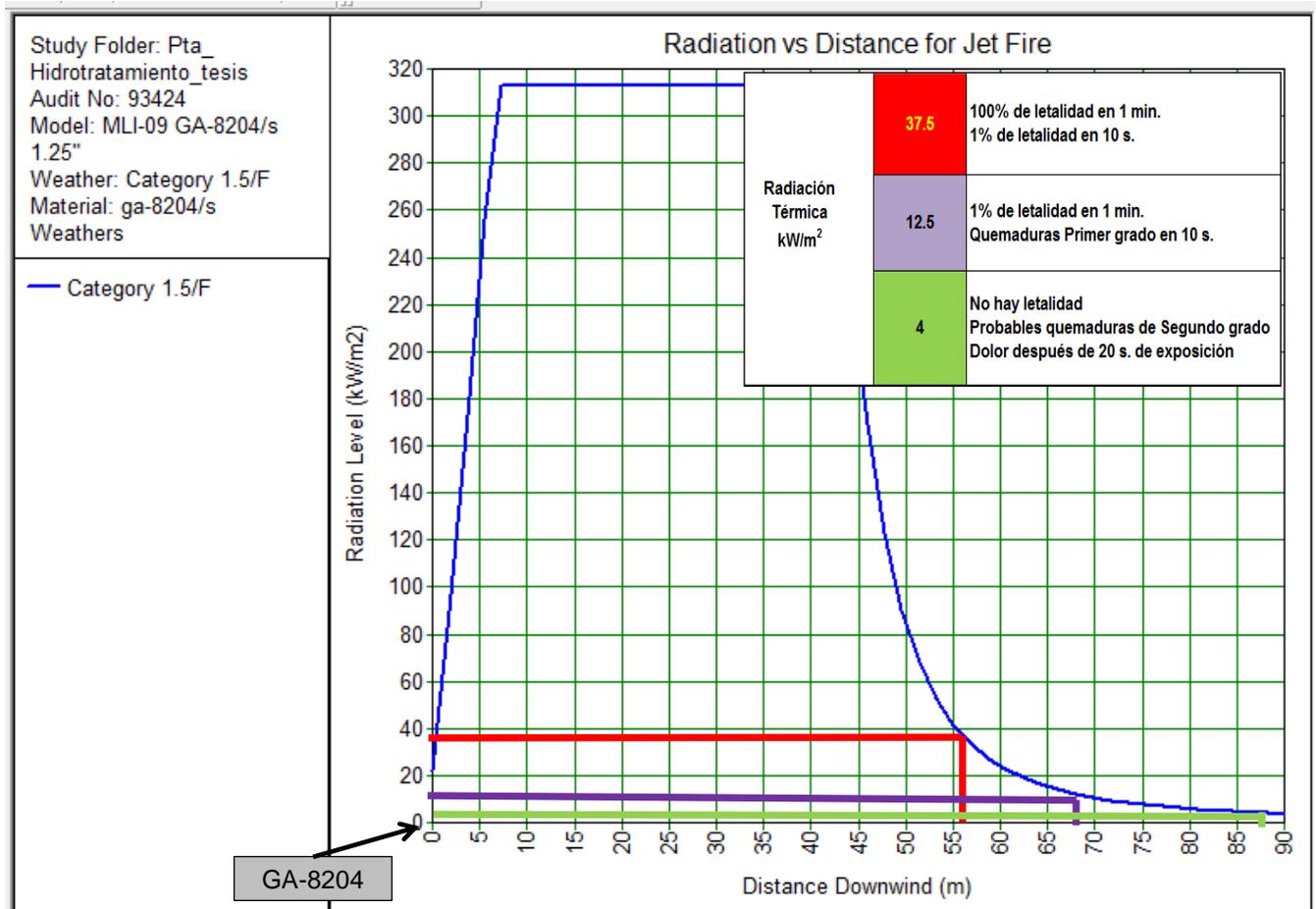


Figura 33 Gráfica de radiación escenario 9

Escenario10 Diámetro de fuga 1.25” Compresor de Gas de Reciclo: GB-8201S.

Sobrepresión		
Fuga	Inventario Kg	Distancia segura (m)
Fuga de Hidrógeno en Línea de descarga de 6” del Compresor: GB-8201S	1296	55

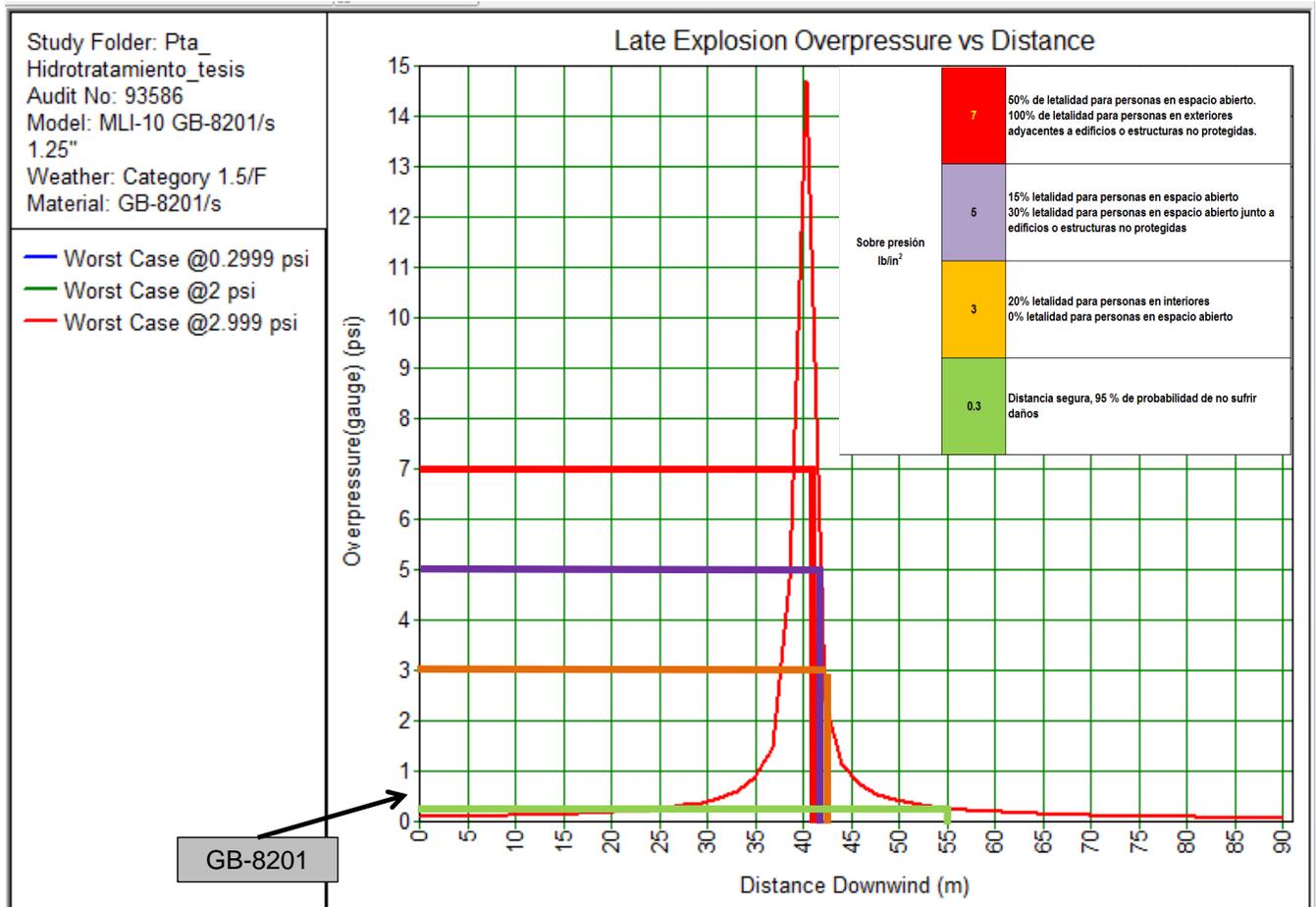


Figura 34 Gráfica de sobrepresión escenario 10

Radiación		
Fuga	Inventario Kg	Distancia segura (m)
Fuga de Hidrógeno en Línea de descarga de 6" del Compresor: GB-8201S	1296	29

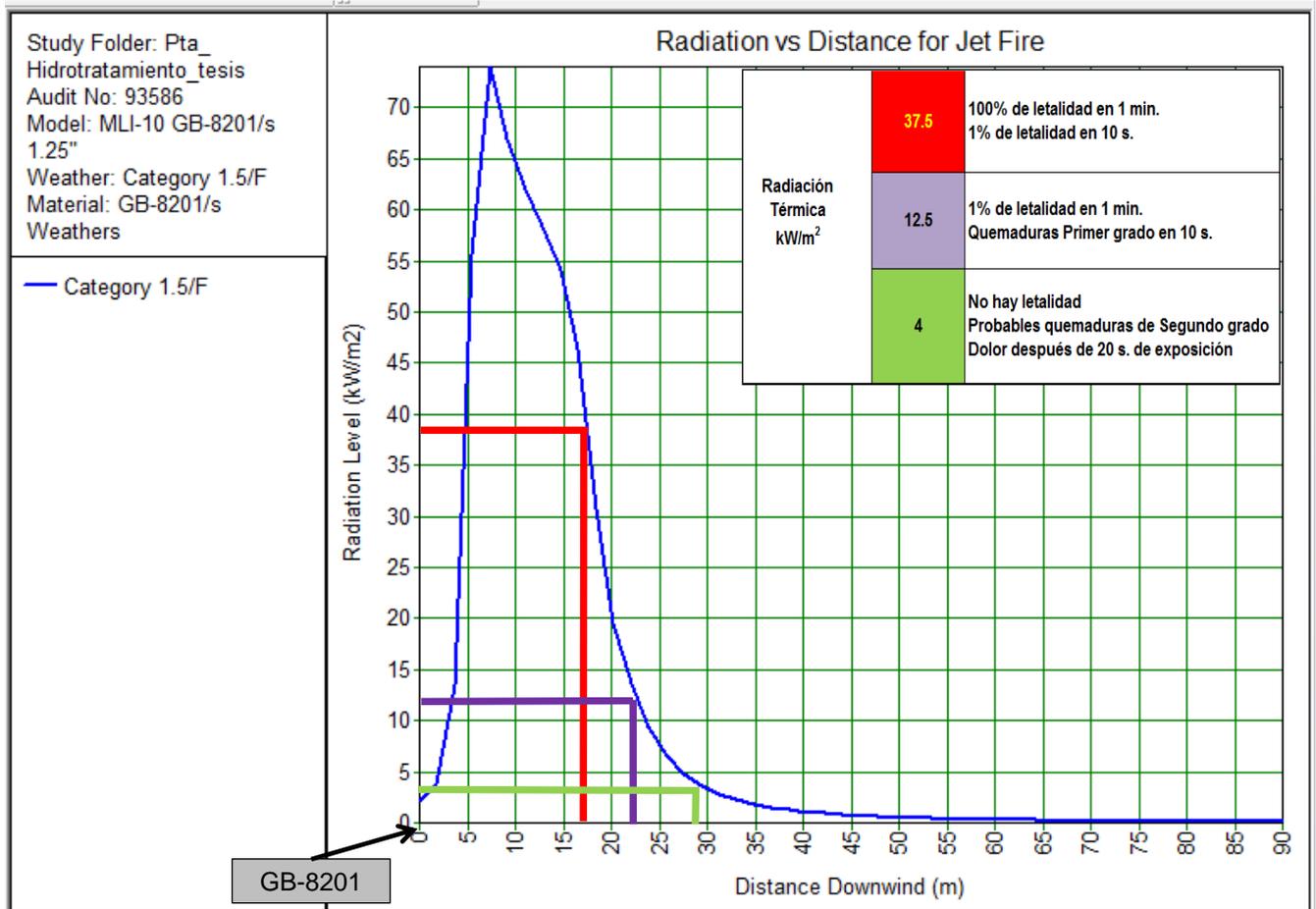


Figura 35 Gráfica de radiación escenario 10



4.3 Estimación de frecuencias

El análisis de frecuencias fue realizado mediante la metodología análisis de árboles de eventos, para calcular las posibilidades de la ocurrencia de accidentes debido a la fuga en los diferentes escenarios.

Los datos de frecuencias de fuga fueron obtenidos de reporte No. 437-1 de la OGP, (International Association of Oil & Gas Producers (OGP), (2010). Process release frequencies. Report No. 437-1) para estimar la frecuencia de fugas en la instalación de la planta hidrotratadora.

Tabla 21 Frecuencia de eventos de pérdida de contención

No. Escenario	Diámetro tubería (pulgada)	Longitud de tubería (metros)	Diámetros de Fuga (pulgada)	*Frecuencias de fuga según el Diámetro de fuga (metro-año)	Frecuencias de fuga (eventos-año)
1	12	1000	0.75	2.40E-06	2.40E-03
2	16	1000	1.25	2.40E-06	2.40E-03
3	6	1000	0.75	2.70E-06	2.70E-03
4	6	1000	0.75	2.70E-06	2.70E-03
5	6	1000	0.75	2.70E-06	2.70E-03
6	12	1000	1.25	2.00E-06	2.00E-03
7	16	1000	2	3.7E-07	3.70E-04
8	6	1000	1.25	2.50E-07	2.50E-04
9	6	1000	1.25	2.50E-07	2.50E-04
10	6	1000	1.25	2.50E-07	2.50E-04

*Fuente: International Association of Oil & Gas Producers (OGP), (2010). *Process release frequencies. Report No. 437-1*

En el desarrollo de estos árboles de eventos, la ignición, es considerada de forma inmediata o de forma tardía. Para este estudio se consideró que los escenarios se desarrollan de manera de fuga continua, considerando la ignición tardía hasta que la nube de vapor se ha

desarrollado, la consecuencia de este será explosiones de nubes de vapor (UVCE) o un flamazo (flash fire).

Los accidentes debido a las fugas de material inflamable están definidos por los siguientes árboles de eventos. (Figura 36 y Figura 37)

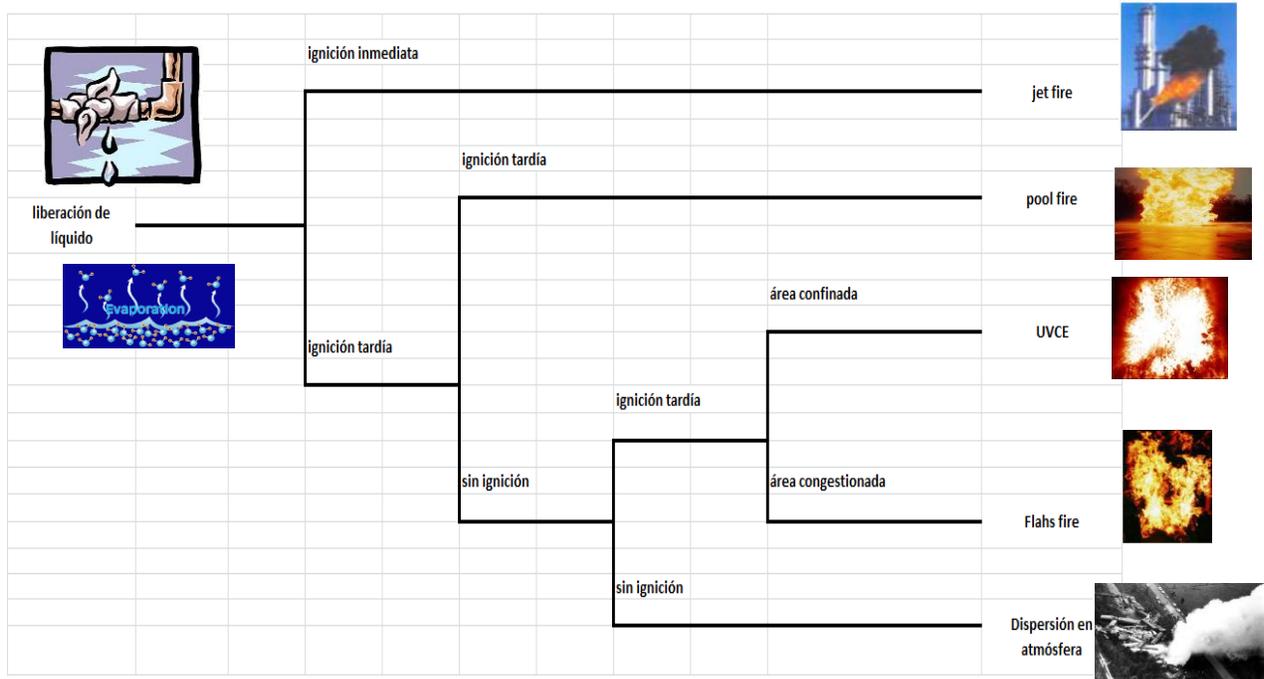


Figura 36 Árbol de eventos liberación de líquidos inflamables

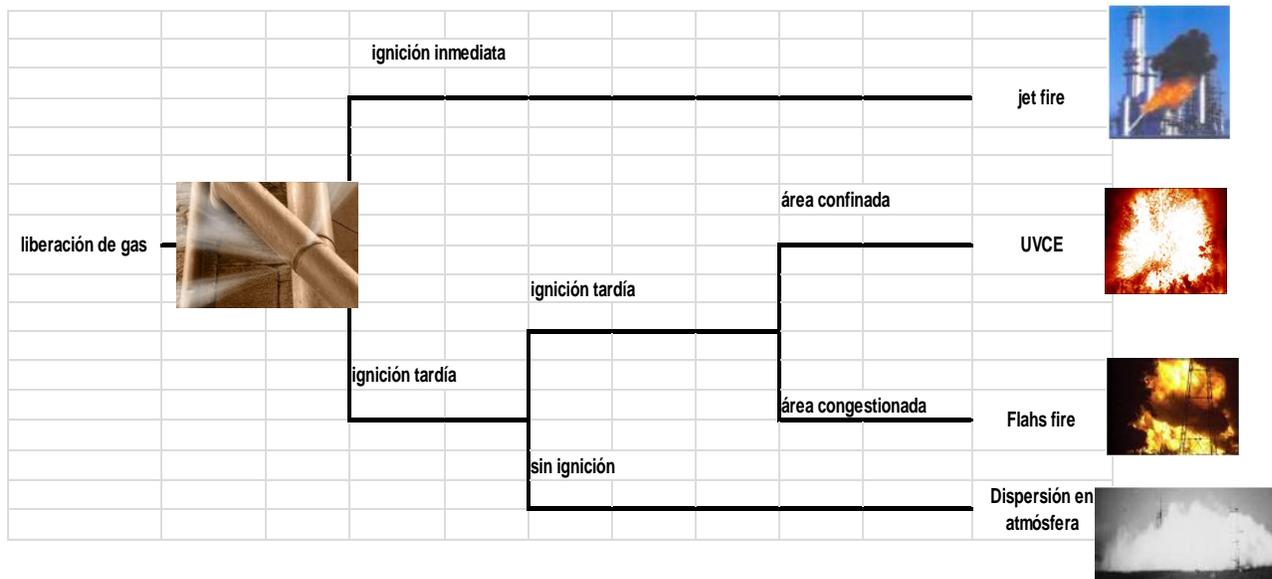


Figura 37 Árbol de eventos liberación de vapores inflamables



De los árboles de eventos, los siguientes accidentes son identificados para el análisis de riesgos:

- Incendio tipo chorro (Jet fire) debido a la ignición inmediata del material fugado.
- Incendio tipo charco (pool fire) debido a la ignición tardía del material fugado.
- Explosión de nube de vapor (UVCE) debido a la ignición tardía del material fugado.
- Flamazo (flash fire) debido a la ignición tardía del material fugado.

4.3.1 Probabilidades de los accidente tipo incendio y /o explosión

Las probabilidades resultantes de la ocurrencia de accidentes tipo incendio y explosión, debido a la fuga de material inflamable en los diferentes escenarios. Es requerida la probabilidad de ignición, los datos fueron obtenidos de reporte No. 434-6.1 de la OGP, (*International Association of Oil & Gas Producers (OGP) (2010). Ignition probabilities. Report No. 436-6.1*).

En la Tabla 22, la frecuencia inicial de fuga, significa la tasa de falla de las tuberías. En otras palabras, es la probabilidad de liberación de material inflamable. La frecuencia resultado significa la probabilidad de que el accidente resultante procedente de la análisis de árbol de eventos que se calcula a partir de la frecuencia de falla multiplicado por la probabilidad ignición.

Tabla 22 Resultados del análisis de frecuencias

Escenario	Tamaño de orificio de fuga	Frecuencia de falla	Tipo de accidente	Probabilidad asignada			Probabilidad de ignición	Frecuencia resultante
				Ignición inmediata	Ignición tardía	Congestio- namiento confinamiento		
1	0.75"	2.40E-03	Jet fire	0.0173			0.0173	4.15E-05
			Pool fire	0.9827	0.0173		0.0170	4.08E-05
			UVCE	0.9827	0.0173	0.5	8.50E-03	2.04E-05
			Flash fire	0.9827	0.0173	0.5	8.50E-03	2.04E-05
2	1.25	2.40E-03	Jet fire	0.0134			0.0134	3.22E-05
			UVCE	0.9866	0.0134	0.5	6.61E-03	1.59E-05
			Flash fire	0.9866	0.0134	0.5	6.61E-03	1.59E-05



Escenario	Tamaño de orificio de fuga	Frecuencia de falla	Tipo de accidente	Probabilidad asignada			Probabilidad de ignición	Frecuencia resultante
				Ignición inmediata	Ignición tardía	Congestio- namiento confinamiento		
3	0.75"	2.70E-03	Jet fire	0.0173			0.0173	4.67E-05
			Pool fire	0.9827	0.0173		0.017	4.59E-05
			UVCE	0.9827	0.0173	0.5	8.50E-03	2.30E-05
			Flash fire	0.9827	0.0173	0.5	8.50E-03	2.30E-05
4	0.75"	2.70E-03	Jet fire	0.0143			0.0143	3.86E-05
			Pool fire	0.9857	0.0143		0.014	3.81E-05
			UVCE	0.9857	0.0143	0.5	7.05E-03	1.90E-05
			Flash fire	0.9857	0.0143	0.5	7.05E-03	1.90E-05
5	0.75"	2.70E-03	Jet fire	0.0063			0.0063	1.70E-05
			UVCE	0.9937	0.0063	0.5	3.13E-03	8.45E-06
			Flash fire	0.9937	0.0063	0.5	3.13E-03	8.45E-06
6	1.25	2.40E-03	Jet fire	0.0334			0.0334	8.02E-05
			Pool fire	0.9666	0.0334		0.0323	7.75E-05
			UVCE	0.9666	0.0334	0.5	0.0161	3.87E-05
			Flash fire	0.9666	0.0334	0.5	0.0161	3.87E-05
7	2.0	3.60E-04	Jet fire	0.0370			0.0370	1.33E-05
			UVCE	0.9630	0.037	0.5	0.0178	6.41E-06
			Flash fire	0.9630	0.037	0.5	0.0178	6.41E-06
8	1.25	2.70E-04	Jet fire	0.0310			0.0310	8.37E-06
			Pool fire	0.9690	0.031		0.030	8.11E-06
			UVCE	0.9690	0.031	0.5	0.015	4.06E-06
			Flash fire	0.9690	0.031	0.5	0.015	4.06E-06
9	1.25	2.70E-04	Jet fire	0.0283			0.0283	7.64E-06
			Pool fire	0.9717	0.0283		0.027	7.42E-06
			UVCE	0.9717	0.0283	0.5	0.014	3.71E-06
			Flash fire	0.9717	0.0283	0.5	0.014	3.71E-06
10	1.25	2.70E-04	Jet fire	0.0109			0.0109	2.94E-06
			UVCE	0.9891	0.0109	0.5	5.39E-03	1.46E-06
			Flash fire	0.9891	0.0109	0.5	5.39E-03	1.46E-06



4.4 Cuantificación del riesgo

El cálculo, considera que las contribuciones al riesgo individual de todos los escenarios de accidentes (manifestaciones físicas de las pérdidas de contención como son incendio, explosiones o dispersiones), son aditivos. Por lo tanto el *riesgo individual total*, es igual a la suma de los riesgos individuales de todas las manifestaciones físicas (accidentes) asociados con la planta bajo estudio:

$$RI_{x,y} = \sum_{i=1}^n \Delta IR_{x,y,i}$$

Donde

$IR_{x,y}$ = Al riesgo individual de fatalidad en la ubicación geográfica x , y (posibilidades de fatalidad por año, o año⁻¹)

$IR_{x,y,i}$ = Al riesgo individual de fatalidad en la ubicación geográfica x , y del accidente caso i (posibilidades de fatalidad por año, o año⁻¹)

n = el número total de accidentes caso considerados en el análisis

$$IR_{x,y,i} = f_i * P_{Fi}$$

Donde f_i es la frecuencia del escenario de accidente i (años⁻¹) y P_{Fi} es la probabilidad de que el escenario de accidente i resultara en una fatalidad en la ubicación x , y .

Calcular las contribución al riesgo individual ($\Delta IR_{j_i,if,M,w}$) para el escenario de accidente considerado, incluyendo la frecuencia del evento iniciador, la probabilidad del escenario de accidente, la probabilidad de la estabilidad atmosférica, la probabilidad de la dirección del viento y la probabilidad de muerte en la zona estudiada

$$\Delta IR_{j_i,if,M,w} = f_{ji} * P_{if} * P_M * P_w * P_d$$



Con los siguientes datos meteorológicos:

$P_w = 0.111$, El viento soplando de NW

$P_M = 0.2$, Estabilidad F,

$P_d = 1$, Probabilidad de fatalidad, de acuerdo a lo indicado en la tabla 16

Contribución al riesgo individual por accidente tipo Incendio tipo chorro (jet fire):

$$\Delta f_{jet\ fire} = 4.15E-5 + 3.22E-5 + 4.67E-5 + 3.86E-5 + 1.70E-5 + 8.02E-5 + 1.33E-5 + 8.37E-6 + 7.64E-6 + 2.94E-6 = 2.88E-4$$

$$P = 0.111 * 0.2 * 1 = 0.0222$$

$$\Delta IR_{jet\ fire} = 2.88E-4 * 0.0222 = \underline{6.39E-6\ fatalidades/año}$$

Contribución al riesgo individual por accidente tipo Explosión (UVCE):

$$\Delta f_{explosión} = 2.04E-5 + 1.59E-5 + 2.30E-5 + 1.90E-5 + 8.45E-6 + 3.87E-5 + 6.41E-6 + 4.06E-6 + 3.71E-6 + 1.46E-6 = 1.41E-4$$

$$P = 0.111 * 0.2 * 1 = 0.0222$$

$$\Delta IR_{explosión} = 1.41E-4 * 0.0222 = \underline{3.13E-6\ fatalidades/año}$$

Contribución al riesgo individual por accidente tipo Flamazo (flash fire):

$$\Delta f_{flamazo} = 2.04E-5 + 1.59E-5 + 2.30E-5 + 1.90E-5 + 8.45E-6 + 3.87E-5 + 6.41E-6 + 4.06E-6 + 3.71E-6 + 1.46E-6 = 1.41E-4$$

$$P = 0.111 * 0.2 * 1 = 0.0222$$

$$\Delta IR_{flamazo} = 1.41E-4 * 0.0222 = \underline{3.13E-6\ fatalidades/año}$$

Riesgo individual total

$$IR_{total} = 6.39E-6 + 3.13E-6 + 3.13E-6 = \underline{1.26E-5\ fatalidades/año}$$

4.4.1 Evaluación del riesgo

El riesgo total de incendio y/o explosión de la planta hidrotratadora de $1.26E-5$ fatalidades/año, de acuerdo con los valores de aceptabilidad del riesgo de la empresa en términos de ALARP el riesgo es tolerable

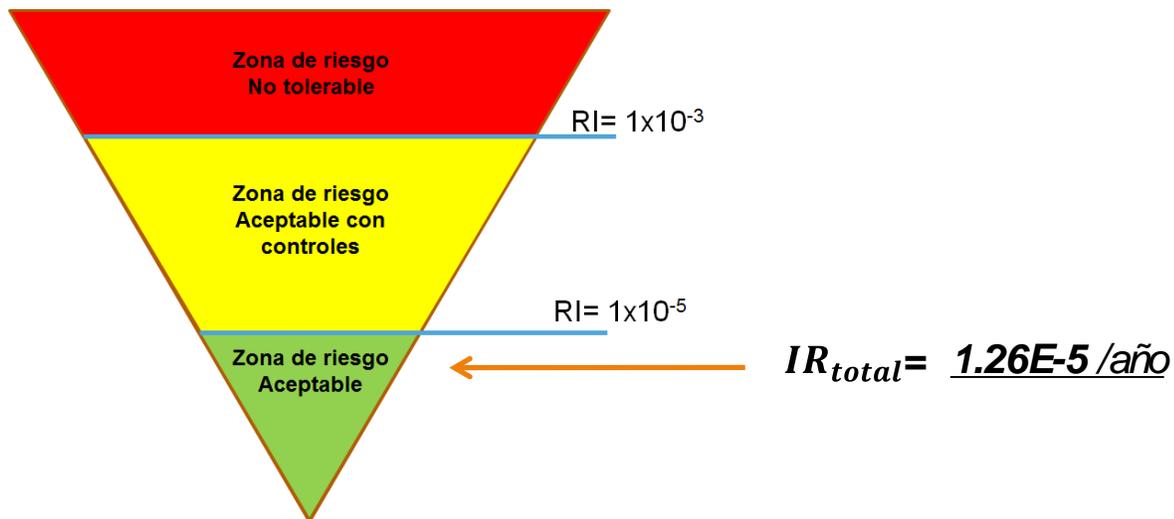


Figura 38 Evaluación del riesgo

Este valor representa que si un accidente de incendio y/o explosión llegara a ocurrir, se esperaría que suceda una vez en la vida de la planta (al menos una vez en diez años) y con la probabilidad de una sola defunción.

4.5 Discusión

Esta investigación se centró en los cuatro tipos de accidentes más probables debido a pérdida de contención de materiales peligrosos en las instalaciones y equipos de la planta, tales eventos accidentales como el chorro de fuego, incendio de charco, explosión y flamazo. Las gráficas del numeral 4.2.2 muestran los resultados de análisis de consecuencia para diámetros de fuga de 0.75, 1.25 y 2 pulgadas, conformando 10 escenarios, los cuales se simularon por medio del programa PHAST 6.54.

En el caso de los incendios tipo chorro (*jet fire*), los ejes vertical y horizontal, muestran la magnitud de radiación y la distancia dirección corriente abajo del punto de fuga, respectivamente.



En el caso del evento de explosión, de mismo modo los ejes horizontal y vertical muestran la magnitud y el radio de alcance de la sobrepresión generada.

Para el criterio de fatalidad, se aplicaron sobre las siguientes bases: El efecto de la radiación del fuego se clasifica con dos criterios que son $37,5 \text{ kW/m}^2$ y $12,5 \text{ kW/m}^2$. Estos valores indican 100% de mortalidad y 50% de mortalidad, respectivamente. Para el caso de la sobrepresión de la explosión se clasifica con tres criterios que son de 7.0 psi, 5.0 psi, estos valores indican 100% de mortalidad, 30% de mortalidad, respectivamente (CCPS, 2000).

Los efectos de los escenarios con mayor alcance se presentan cuando la fuga tiene mayor tamaño de agujero. En caso de pequeño tamaño de fuga (0.75 pulgadas), con la suposición de la liberación de 10 min, los resultados del accidente son menores y se refleja en menores radios de afectación. En caso de una mayor cantidad liberada (ya sea 1.25 o 2 pulgadas), presentan un radio mayor alcance.

Frecuencia de análisis

Análisis de frecuencias se realizó mediante el análisis de Árbol de Eventos (ETA), para calcular las posibilidades de accidentes que se producen por la pérdida de contención en tuberías. Los datos de falla genérico fue referido de E & P Forum y datos de la (OGP, 2010) para estimar la frecuencia de fugas en la planta y considerando un volumen promedio de 1000 metros de tubería de cada diámetro existente en la planta

El árbol de eventos, se ha llevado a cabo mediante la aplicación de tres eventos. El primer evento es la ignición inmediata que puede generar incendios de chorro, y la probabilidad de ignición se aplica teniendo en cuenta la fase y la frecuencia del material inflamable en libertad. Segundo caso se retrasa el encendido en caso de que no se produjo la ignición inmediata. Los accidentes están estrechamente relacionados con el momento de la ignición, como se muestra en el primer y segundo evento. La duración de los retrasos en el encendido afecta al tipo y magnitud del accidente. En caso de retraso en el encendido, se asumió que el tiempo de liberación sería



suficiente para formar la masa de gas inflamable para el peor de los casos de accidente, como VCE o el flash fuego. La probabilidad de ignición retardada se aplicó con la misma forma de la ignición inmediata pero que no utilizan los mismos datos. La probabilidad de ignición está relacionada con la concentración de material inflamable en el aire y al tiempo de encendido, pero el tiempo de encendido, pero el tiempo exacto de ignición es difícil especular en casos reales de accidentes. Tercer evento se asocia con el área circundante donde la liberación de gas y la dispersión ocurre, dividida como el espacio congestionado o confinado, con 50% de probabilidad asignada a cada uno. La ignición tardía, combinada con el área congestionada y confinado puede dar el resultado de incendio repentino o explosión, respectivamente.

La fatalidad se aplicó al análisis de frecuencia: cuando la letalidad es 100%, la frecuencia resultado se multiplica por 1. Del análisis de frecuencia el resultado obtenido fue en el intervalo de $8.37E-06$ (los datos de frecuencia más baja) a $1.59E-05$ (los datos de frecuencia más alta) de acuerdo con la condición de proceso. Las muertes se adaptan a los datos de frecuencia de la misma manera de los resultados del análisis de consecuencias.

El riesgo de incendio y/o explosión determinado por esta planta en un valor de $1.27 E-5$ no muestra diferencia significativa con respecto a el riesgo determinado por (Dan, s. et al, 2014) en su estudio de riesgo, realizado a la unidad flotante de producción y almacenamiento de gas.

En este estudio se determinó que la letalidad por sobrepresión es del 100% a un Radio de 3m con respecto del centro de explosión, lo cual no muestra diferencia significativa con respecto al estudio cuantitativo de riesgo QRA en una planta de hidrogeno realizado por (Soman, A. R., 2012).





CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

Se determinó el riesgo de incendio y/o explosión de la planta de hidrotreatmento de gasolina, obteniéndose un riesgo tolerable de acuerdo a los criterios establecidos por la Health and Safety Executive (HSE) del Reino Unido.

Para obtener la anterior respuesta a la pregunta de investigación realizada, se utilizó la metodología de análisis de riesgo cuantitativo QRA y con la aplicación de sus etapas sistemáticas se logró determinar el riesgo individual total de la planta, a través de la cuantificación de la magnitud de los efectos por la radiación y sobrepresión de eventos accidentales que pueden ocasionar pérdidas humanas. Asimismo se determinó la frecuencia con la cual ocurriría el evento accidental, por medio de la elaboración de árboles de eventos. Finalmente por medio de la combinación de la frecuencia y la consecuencia obtenida se determinó numéricamente el riesgo de incendio y/o explosión encontrándose dentro de los rangos tolerables.

Es importante recalcar que si solo interpretáramos los resultados obtenidos de la evaluación de las consecuencias tendríamos una determinación parcial del riesgo. Sin embargo, los resultados obtenidos por la evaluación de las consecuencias nos proporcionan la información necesaria para la elaboración de planes de respuesta a emergencias, mediante la representación de los radios de afectación que nos permitirán establecer las acciones de mitigación, rutas de evacuación y con ello minimizar las afectaciones a las instalaciones, medio ambiente y sobre todo a la salud y vida de los trabajadores.

Con la evaluación de la frecuencia, se realizó la determinación completa de la clasificación del riesgo. El valor que se obtuvo en este estudio, permitió comprobar que los eventos accidentales de grandes consecuencias tienen baja probabilidad de ocurrencia por esta razón en términos de frecuencia el riesgo determinado en este estudio se encuentra dentro del rango tolerable .





CAPÍTULO 6. RECOMENDACIONES

Para futuros trabajos

Llevar a cabo una simulación dinámica de fluidos computacional (CFD) para determinar con mayor precisión los valores de congestionamiento-confinamiento, con el fin de tener un valor más real del comportamiento de la dispersión de los materiales fugados.

Realizar la evaluación sobrepresión mediante el modelo TNT equivalente y comparar el contra los radios obtenidos con el método de multi-energía.

Efectuar los cálculos de explosiones e incendio, considerando las condiciones atmosféricas del lugar y compararlas con los resultados obtenidos en este proyecto que empleo los parámetros conservadores como son velocidad de viento de 1.5 m/s y estabilidad atmosférica F.

A la organización

Para mantener el riesgo de incendio y explosión como aceptable de acuerdo con los parámetros de tolerabilidad establecidos por la Health and Safety Executive (HSE) del Reino Unido, es requerido mantener la integridad de las capas de protección de la planta. (Figura 39)

Es requerido contar mecanismos de control para administrar los programas de mantenimiento así como su ejecución con el propósito de que los equipos, componentes y sistemas críticos, mantengan sus características originales de diseño y minimizar el riesgo representados por el potencial de fallas (mecánicas, eléctricas y de instrumentación), a lo largo de toda la vida útil de las instalaciones



Figura 39 Capas de Protección

Establecer un sistema de control para la “Administración de Cambios de Personal”, con el propósito de identificar y controlar oportunamente los riesgos asociados que se puedan introducir al realizar este tipo de cambios y que puedan ser causa de incidentes.

Asegurar que los cambios de personal, se realicen con base en los criterios establecidos (cualitativos y cuantitativos) por la Línea de Mando.

Garantizar, que se mantengan los niveles mínimos de experiencia, capacitación y habilidades del personal en las operaciones críticas.





REFERENCIAS

- ASTM. (2001). Standard Terminology of fire Standards. (ASTM E176-01). Conshohocken, PA.: ASTM International.
- Abramowitz, M. & Stegun, I. A. (1970). Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables. New York: Dover Publications Inc.
- Assael, M, J. & Kakosimos, K, E. (2010). Fires, Explosions, and Toxic Gas Dispersions, United States: CRC Press.
- Babrauskas, V., Levin, B.C., Gann, R. G., Paabo, M., Harris, R. H., Jr., Peacock, R. D., & Yusa, S. (1991). Toxic Potency Measurement for Fire Hazard Analysis. (NIST Special Publication 827). Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology.
- Babrauskas, V., Harris, R. H., Jr. Gann, R. G., Levin, B.C., Lee, B. T., Peacock, R. D., Paabo, M., Twilley, W., Yoklavich, M. F. & Clark, H. M. (1988). Fire Hazard Comparison of Fire-Retarded and Non-Fire-Retarded Products. (NBS Special Publication 749). Gaithersburg, MD: National Bureau of Standards, U.S. Department of Commerce.
- Baker, W. E., Cox P.A., & Westine, P. S. (1983). Explosion Hazards and Evaluation. New York: Elsevier Scientific Publishing Company.
- Beitel, J. J., Bertello, C. A., Carroll, W. F., Jr., Grand, A. F., Hirschler, M. M., & Smith, G. F. (1987). Hydrogen Chloride Transport and Decay in a Large Apparatus: II, Variables Affecting Hydrogen Chloride Decay. *Journal of Fire Sciences*, 5(2), 105-145.
- Bestratén, M. (1993). Los análisis de peligros y de operabilidad en instalaciones de proceso. (NTP 238). Barcelona: INSHT.
- Beyler, C.L., & Hirschler, M. M. (2002). Thermal Decomposition of polymers. En Din Enno, P. J. et al. (Ed.). *SFPE Handbook of fire protection Engineering*, 3rd ed. (1-110 a 1-131). Quincy, MA.: National Protection Association.
- Bowen, J.G., Fletcher, E.R. & Richmond, D. R. (1968). Estimate of Man's Tolerance to the Direct Effects of Air Blast. (Report DASA-2113). Albuquerque, New Mexico: Lovelace Foundation for Medical Education and Research.
- Burgess, W. A., Treitman, R. D. & Gold, A. (1979). *Air Contaminants in Structural Firefighting*. Boston: Harvard School of public Health.
- Carol, L.S. (2001). Una nueva metodología para la predicción de la gravedad de los accidentes industriales aplicando el análisis histórico. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.



- Casal J., Montiel, H., Planas, E. P. y Vílchez, J. (2001). Análisis de riesgos en instalaciones industriales. España: Alfa omega.
- Casal J., Montiel, H., Planas, E. P. y Vílchez, J. (1999). Análisis de riesgo en instalaciones industriales. Barcelona: UPC.
- Casal, J. (2007). Evaluation of the effects and consequences of major accidents in industrial plants. España: Elsevier.
- Casillas, Martínez, G. H. (2011). Evaluación del grado de riesgo de incendio en una escuela de nivel superior. Propuesta de mejora. (Tesis de maestría). Instituto Politécnico Nacional, Esc. Nacional de Medicina y Homeopatía. Distrito Federal, México.
- Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2000). Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis. EUA: Wiley.
- Center for Chemical Process Safety (CCPS). (1989). Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases. EUA: Wiley.
- Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2008). Guidelines for hazard evaluation procedures, EUA: Wiley.
- Crowl, D. A. & Louvar, J. F. (2002). Chemical process safety, fundamentals with applications. United States: Prentice Hall.
- Crowl, D. A. (2003). Understanding explosions. United States: CCPS publication.
- Chang, J. I., Lin, C. C. (2006). A Study of storage tank accidents. *J. Loss Prev. Process Ind.*, 15, 291-303.
- Christian, S. D., and Shields, T. J. (2000). Safe Tolerability limits for Carbon monoxide? A Review of the Clinical and Fire Engineering Implications of a Single, Acute, Sublethal Exposure. *Journal of Fire Sciences*, 18, 308-323.
- Dan, S., Lee, Ch. J., Park, J, Shin, D. & Yoon, E. S. (2014), Quantitative risk analysis of fire and explosion on the top-side LNG-liquefaction process of LNG-FPSO. *Process Safety and Environmental Protection*, 92, 430-441.
- Department of energy. (2004). Handbook chemical process hazard analysis. EUA, Washington, D.C.: DOE.
- Díaz, A. F. (2006). Análisis de consecuencias y zonas de planificación para explosiones industriales accidentales. (Tesis doctoral). Universidad de Murcia, Murcia.



- Esposito, F. M. & Alarie, Y. (1992). Inhalation Toxicity of Carbon Monoxide and Hydrogen Cyanide Gases Released during the Thermal Decomposition of Polymers. En Hartzell, G. E. (Ed.), *Advances in Combustion Toxicology*, Vol. III, (78-125). Lancaster, PA.: Technomic Publishing Co. Inc.
- Ferrero, F. (2006). Incendios de hidrocarburos: estudio de la formación y evolución del boiler de capa fina. (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Fuentes Peña, J. & Rubio Romero, J. C. (2003). Análisis comparativo de los principales métodos de evaluación de riesgo de incendio. *Seguridad y Salud en el Trabajo*, 25, 12-17.
- Gómez, E. (2012). Protección contra incendio en Refinerías. (Tesis de maestría). Universidad Pontificia Comillas, Madrid.
- Grand, A. F., Kaplan, H. L., Beitel, J. J., Switzer, W. G., & Hartzell, G. E. (1986). An Evaluation of Toxic Hazards From Full Scale Furnished Room Fire Studies. (Special Technical Publication 882). Conshohocken, PA.: ASTM International.
- Guoshum, Z. (2000). Causes and lessons of five explosion accidents. *J. Loss Prev. Process Ind.*, 13, 439-442.
- Halpin, B. M. & Berl, W. G. (1978). Human Fatalities from Unwanted Fires. (Report NBS-GCR-79-168). Washington, DC: U. S. National Bureau of Standards.
- Harland, W. A. & Woolley, W. D. (1979). Fire Fatality study. (Building Research Establishment Information Paper, IP 18/79). Glasgow, UK: University of Glasgow.
- Hartzell, G. E. (1994). Smoke Toxicity and Toxic Hazards in Fires. *ASTM Standardization News*, 22(11), 38-43.
- Hartzell, G. E., Packham, S. C., Grand, A. F. & Switzer, W. G. (1985). Modeling of Toxicological Effects of Fire Gases: III. Quantification of Post exposure Lethality of Rats from exposure to HCL Atmospheres. *Journal of Fire Sciences*, 3(3), 195-207.
- Hartzell, G. E., Switzer, W. G. & Priest, D. N. (1985). Modeling of Toxicological Effects of Fire Gases: V. Mathematical modeling of Intoxication of Rats by Combined Carbon Monoxide and Hydrogen Cyanide Atmospheres. *Journal of Fire Sciences*, 3(5), 330-342.
- Hartzell, G. E. & Switzer, W. G. (1985). On the Toxicities of Atmospheres Containing Both CO and CO₂. *Journal of fire Sciences*, 3(5), 307-309.
- Hassim, M. H., Hurme, M., Amyotte, P. R., & Khan, F. I. (2012). Fugitive emissions in chemical processes: The assessment and prevention based on inherent and add-on approaches. *J. Loss Prev. Process Ind.*, 25, 820-829.



- Hirsch F.G. (1968). Effects of Overpressure on the Ear - A Review. *Ann. N Y Acad. Sci.*, 152, 147-162.
- Hirschler, M. M. (1993). *Carbon monoxide and Human Lethality*. Oxford, UK: Elsevier Science Ltd.
- Hoel, P. G. (1962). *Introduction to Mathematical Statistics*. 3rd ed. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc.
- International Association of Oil & Gas Producers (OGP). (2010). *Major accident*. (Report No. 437-17). London, UK: OGP
- ISO TS 13571. (2002). *Life-Threatening Components of Fire – Guidelines for the Estimation of Time Available for Escape Using Fire Data*. (ISO TS 13571). Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- ISO 17776. (2000). *Guía sobre herramientas y técnicas para identificación de peligro y evaluación de riesgos*. (ISO 17776). Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- Kaplan, H. L., Switzer, W. G., Hinderer, R. K. & Anzueto, A. (1993). A study on the acute and Long-term Effects of Hydrogen Chloride on the Respiratory Response and Pulmonary Function and Morphology in the Baboon. *Journal of Fire Sciences*, 11, 459-484.
- Kaplan, H. L., Switzer, W. G., Hinderer, R. K., & Anzueto, A. (1993). Acute and Long-Term Effects of Polyvinylchloride (PVC) Smoke on the Respiratory System of the Baboon and a Comparison with the Effects of Hydrogen Chloride (HCL). *Journal of Fire Sciences*, 11(6), 485-511.
- Kaplan, H. L., Switzer, W. G., Hinderer, R. K., and Anzueto, A. (1993). Studies of the Effects of Hydrogen Chloride and Polyvinylchloride (PVC) smoke in Rodents. *Journal of fire sciences*, 11(6), 512-552.
- Kaplan, H. L., Grand, A. F., Switzer, W. G., Mitchell, D. S., Rogers, W. R., & Hartzell, G. E. (1985). Effects of combustion Gases on Escape Performance of the Baboon and Rat. *Journal of fire Sciences*, 3(4), 228-244.
- Kaplan, H. L. & Hartzell, G. E. (1984). Modeling of Toxicological Effects of Fire Gases: I. Incapacitating Effects of Narcotic Fire Gases. *Journal of fire Sciences*, 2(4), 286-305.
- Kane, L. E., Barrow, C. S. & Alarie, Y. (1979). A Short-Term Test to Predict Acceptable Levels of Exposure to Airborne Sensory Irritants. *Amer. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 40, 207-229.



- Kimmerle, G. (1974). Aspects and Methodology for the Evaluation of Toxicological Parameters During Fire Exposure. *Journal of Fire and Flammability/Combustion Toxicology Supplement*, 1, 42.
- Lagadec, P. (1980). *Le risque technologique majeur*. France: Pergamon Press.
- Lea C.G. & Ledin H.S. (2002). A Review of the State-of-the-Art in Gas Explosion Modelling. (HSL Report 02). Harpur Hill, Buxton: Health & Safety Laboratory.
- Levin, B. C., Paabo, M., Highbarger, L. & Eller, N. (1989). Synergistic Effects of Nitrogen Dioxide and Carbon Dioxide Following Acute Inhalation Exposures in Rats. (NISTIR 89-4105). Gaithersburg, MD.: National Institute of Standards and Technology.
- Levin, B. C., Paabo, M., Gurman, J. L., & Harris, S. E. (1987). Effects of Exposure to Single or Multiple Combinations of the Predominant Toxic Gases and Low-Oxygen Atmospheres Produced in fires. *Fundamental and applied Toxicology*, 9, 236-250.
- Levin, B. C., Paabo, M., Gurman, J. L., Harris, S. E., & Braun, E. (1986). Toxicological Interactions between Carbon Monoxide and carbon Dioxide. *Proceedings of the 16th Conference of Toxicology*, Air Force Medical Research Laboratory, Dayton, OH, *Toxicology*, 47, 135-164.
- Lobo Benítez, A. L. (2010). *Lineamientos para la Gestión de Riesgos Tecnológicos como Elemento de Sostenibilidad Urbana. Caso de Estudio: Complejo Petroquímico Morón, municipio Juan José Mora. Estado Carabobo, Venezuela. (Tesis de maestría)*. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.
- Mannan, S. (2013). *Lee's Process safety essentials*, 1st edition. United States: ELSEVIER.
- Marhavilas, P. K., Koulouriotis, D. & Gemeni, V. (2011). Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000-2009, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24, 477-523.
- NFPA. (2009). *Manual de Protección contra incendios*. Estados Unidos: NFPA.
- Nolan, D. P. (1996). *Handbook of fire and explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical, and related facilities*. Estados Unidos: Noyes publications.
- Nolan, D. P. (2014). *Handbook of fire and explosion protection engineering principles*. Estados Unidos: Elsevier.
- Ohlemiller, T. J. (2002). Smoldering Combustion. En DiNunno, P. J. et al. (Ed.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd ed. (2-200-2-211). Quincy, MA: National Fire Protection Association.



- Pietersen, A. M. (1990). Consequences of accidental releases of hazardous material. *J. Loss Prev. Process Ind.*, 19, 51-59.
- Pons I Grau, V. (2003) *Dinámica del fuego*. España: Ediciones del Bullent
- Potts, J. W., Lederer, T. S., and Quast, J. F. (1978). A Study of Inhalation Toxicity of Smoke Produced upon Pyrolysis and combustion of Polyethylene Foams, Part 1: Laboratory Studies. *J. Comb. Tox.*, 5, 408-433.
- Pritchard, D.k. (1989). A review of methods for predicting blast damage from vapor cloud explosions. *J. Loss Prev. Process Ind.*, 2, 187- 193.
- Pulido, J. L. (2005). *Prevención y control de incendios y explosiones en la producción y almacenamiento de gas licuado de petróleo – GLP*. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.
- Purser, D. A. (2002). Toxicity Assessment of Combustion Products. En DiNenno, P. J. et al. (Ed.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd ed. (2-83-2-171). Quincy, MA.: National Fire Protection Association.
- Purser, D. A., Grimshaw, P., & Berrille, K. R. (1984). Intoxication by Cyanide in Fires: A Study in Monkeys Using Polyacrylonitrile. *Archives of Environmental Health*, 39, 394.
- Razynskas, M. A. (2011). *Manejo de emergencias con materiales peligrosos*. México: Trillas.
- Reinke, R. W. & Reinhardt, C. F. (1973). Fire, Toxicity, and Plastics. *Modern Plastics*, 94-98.
- Roughton, F. J. W. & Darling, R. C. (1944). The Effect of carbon Monoxide on the Oxyhemoglobin Dissociation Curve. *American Journal of Physiology*, 141, 17-31.
- Sanders, D. C. & Endecott, B. R. (1992). The Effect of Elevated Temperature on Carbon Monoxide-Induced Incapacitation. En Hartzell, G. E. (Ed.), *Advances in Combustion Toxicology*, 3, (343-357). Lancaster, PA.: Technomic publishing C. Inc.
- Santos, Reyes, G. C. (2010). *Análisis de riesgo individual: Caso de explosión de un ducto de gas natural*. (Tesis de maestría). Instituto Politécnico Nacional, Esc. Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Distrito Federal, México.
- Soman, A. R., Sundararaj, G. (2012). Consequence assessment of vapor cloud explosion involving hydrogen release. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2, 291- 297.
- Smith, R.P. (1986), *Toxic Responses of the Blood*. Casarett and Doull's Toxicology, 3rd ed. New York: Macmillan Publishing Company.



- Stewart, R. D., Peterson, J. E., Fisher, T. N., Hosko, M. J., Baretta, E. D., Dodd, H. C. & Herrmann, A. A. (1973). Experimental Human Exposure to High Concentrations of Carbon Monoxide. *Archives of Environmental Health*, 26, 1-7.
- Storch, J. M., García, T. (2008). Seguridad industrial en plantas químicas y energéticas., España: Díaz de Santos.
- Storch, J. M. (1998). Manual de seguridad industrial en plantas químicas y petroleras. Fundamentos, evaluación de riesgos y diseño. Madrid: Mc Graw Hill.
- Sutton, I. (2015). Process Risk and reliability management. United States: Elsevier.
- Swinyard, E. A. (1965). Noxious Gases and Vapors: Carbon Monoxide, Hydrocyanic Acid, Benzene, Gasoline, Kerosene, Carbon Tetrachloride, and Miscellaneous Organic Solvents. En Goodman, L. and Gilman, A. (ed.), *The Pharmacological basis of Therapeutics*, 3rd ed. (915-928). New York: Macmillan Publishing Co.
- Tewarson, A. (2002). Generation of heat and Chemical Compounds in Fires. En DiNenno, P. J. et al. (Ed.), *SFP Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd ed. (3-82-3-1161). Quincy, MA.: National Fire protection Association.
- Tixier, J., Dusserre, G., Salvi, O. & Gaston, D. (2002). Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants. *J. Loss Prev. Process Ind.*, 15, pp 291-303
- TNO, (1989). Methods for the Determination of Possible Damage to People and Objects Resulting from Releases of Hazardous Materials. (Green book, Report CPR 16E). Voorburg, Holanda: Director General of Labour
- Kletz, T. (1998). Process Plants – A handbook for inherently safer design. EUA: Taylor & Francis
- Tsuchiya, Y. (1989). Relative Significance of NOx and HCN in Fire Gas Toxicity. En Wakamatsu, T. (Ed.), *Fire Safety Science-Proceedings of the 2nd international symposium*, (381-390). New York: Hemisphere Publishing Co.



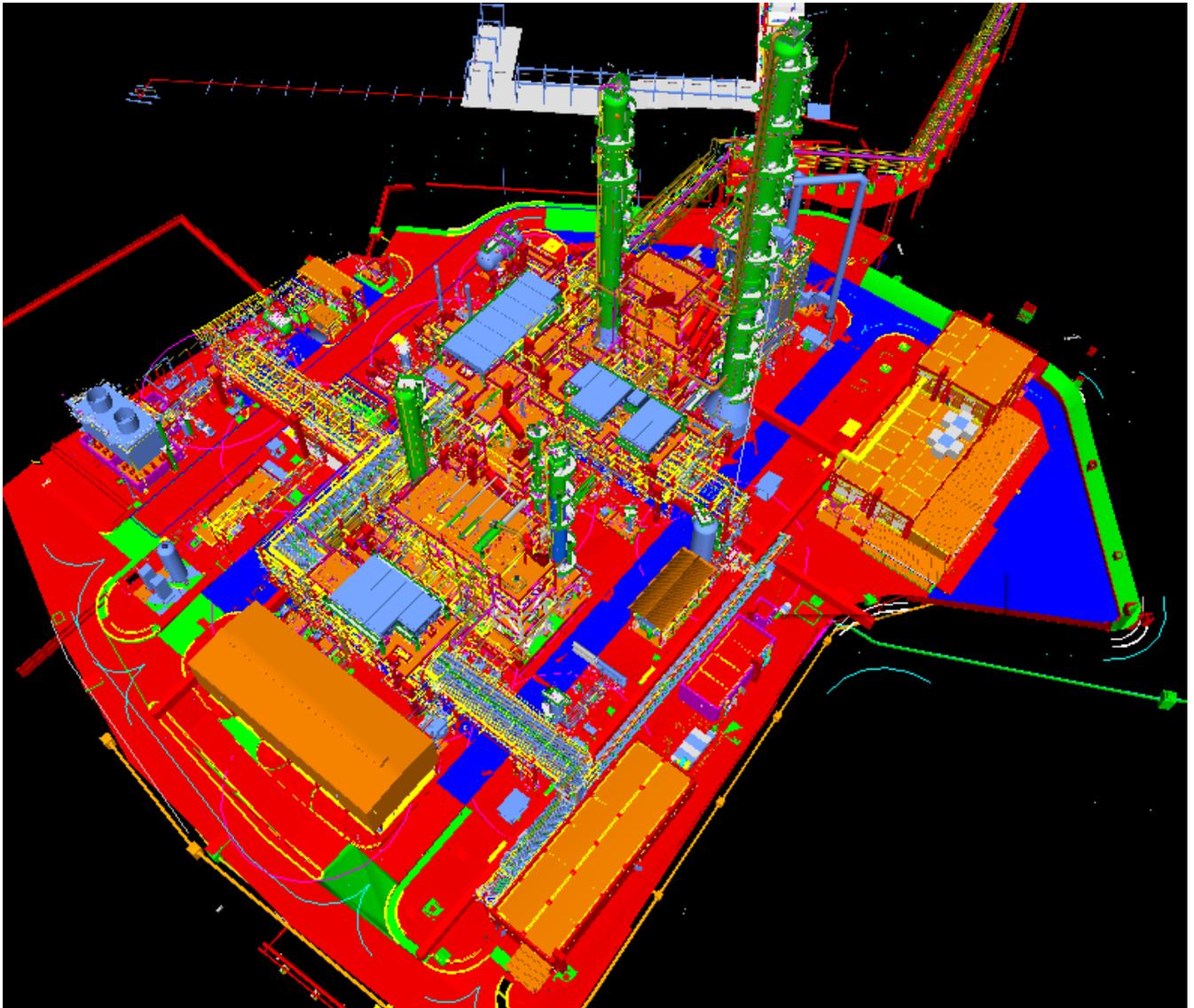


ANEXOS



ANEXO 1

Esquema de la planta en estudio

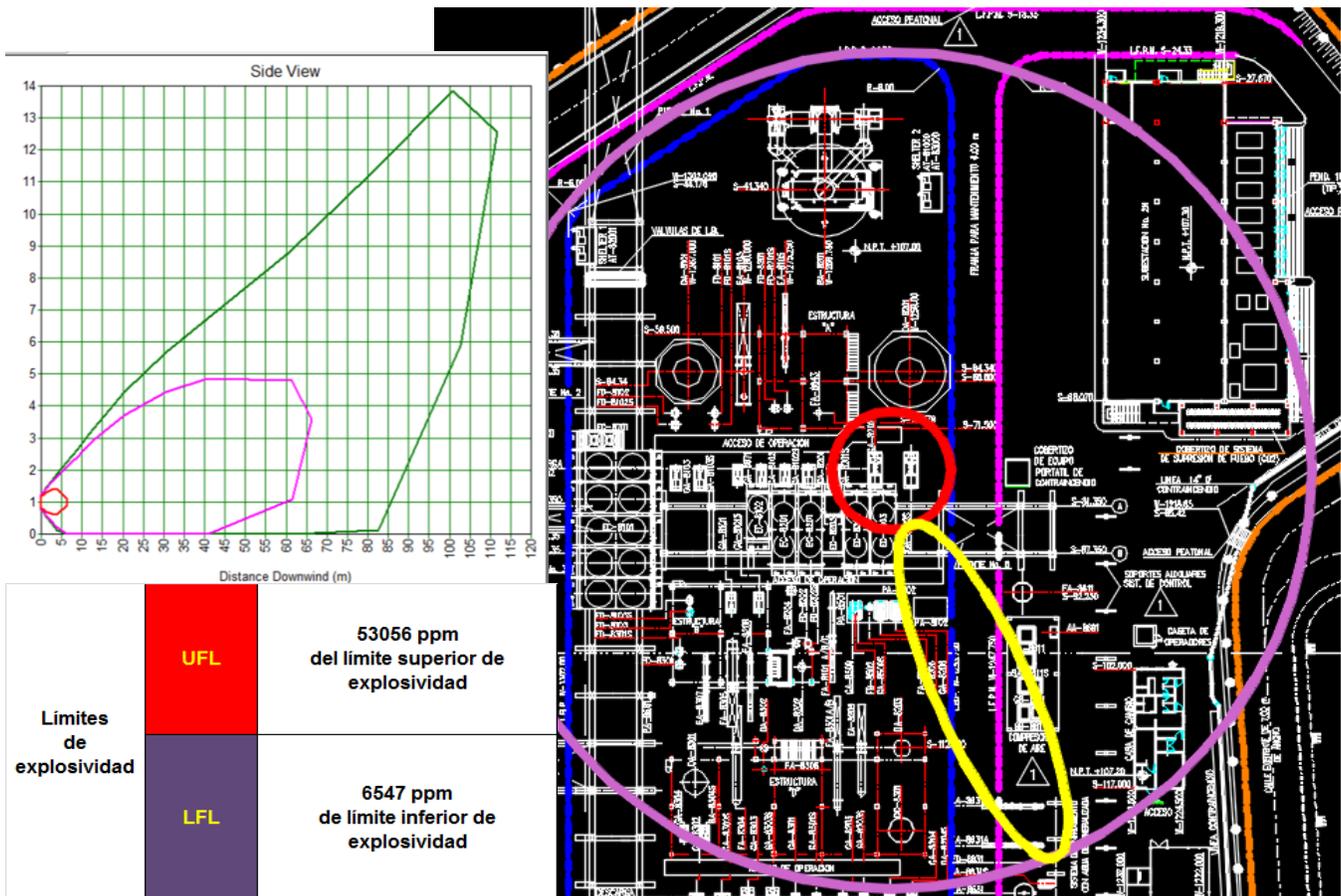




ANEXO 2

Se muestran el comportamiento de la dispersión del material fugado en el grafico se indican los límites de inflamabilidad, dentro de los cuales de encontrar un punto de ignición la nube puede desarrollar una explosión, más allá del límite inferior de inflamabilidad LFL la concentración disminuye y el probable resultado puede ser un Flamazo (flash Fire)

Dispersión



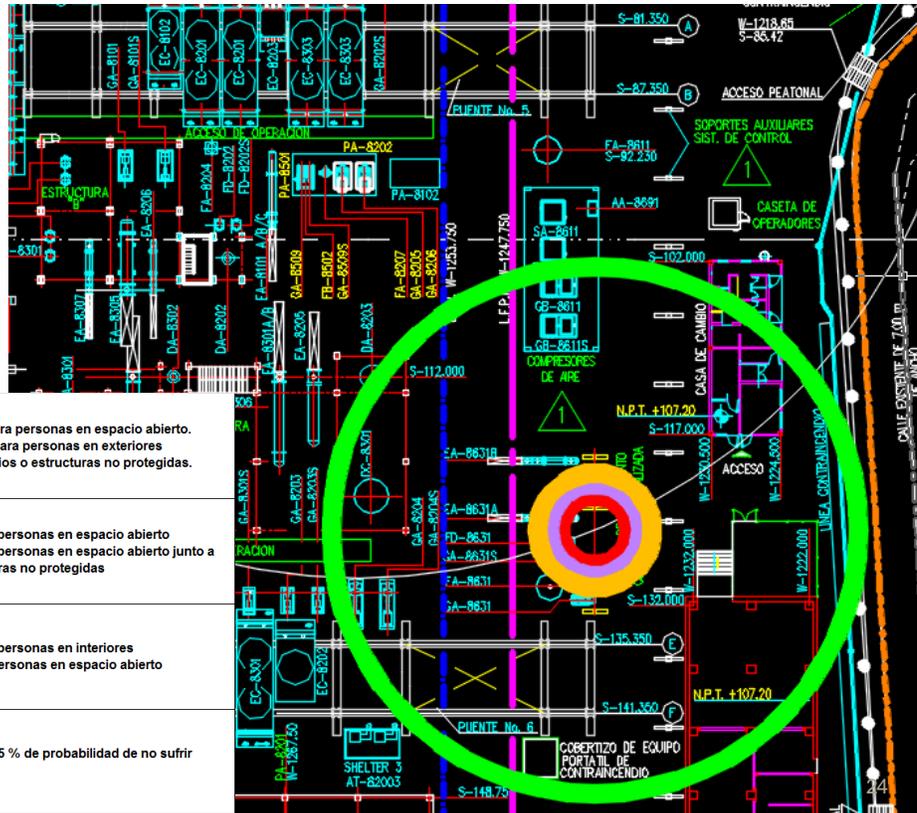




ANEXO 4

Se representa los radios de las diferentes magnitudes de sobrepresión estimadas con el método de TNO multi-energía, estima que la fuerza de choque que es generado por la cantidad de la nube que está parcialmente confinada, mientras que el resto de la nube, simplemente ardera sin ninguna contribución significativa sobre la magnitud de la onda de choque

Sobrepresión



Sobre presión lbf/in ²	7	50% de letalidad para personas en espacio abierto. 100% de letalidad para personas en exteriores adyacentes a edificios o estructuras no protegidas.
	5	15% letalidad para personas en espacio abierto 30% letalidad para personas en espacio abierto junto a edificios o estructuras no protegidas
	3	20% letalidad para personas en interiores 0% letalidad para personas en espacio abierto
	0.3	Distancia segura, 95 % de probabilidad de no sufrir daños

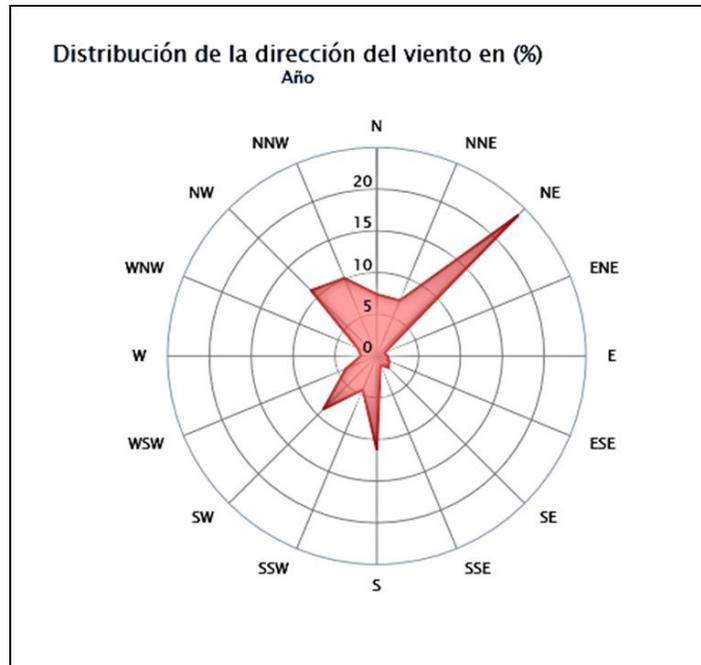


ANEXO 5

ROSA DE VIENTO

Las estadísticas de viento del área geográfica donde se encuentra la planta de estudio esta provista por la rosa de viento,

j	Dirección del viento	ángulo	Probabilidad
1	N	0	7.4
2	NNE	22.5	7.2
3	NE	45	23.8
4	ENE	67.5	1
5	E	90	1.3
6	ESE	112.5	1.6
7	SE	135	2
8	SSE	157.5	1.2
9	S	180	11.2
10	SSW	202.5	4.4
11	SW	225	9
12	WSW	247.5	4
13	W	270	1.9
14	WNW	292.5	2.5
15	NW	315	11.1
16	NNW	337.5	10.1



Recuperado de <http://es.windfinder.com/windstatistics/coatzacoalcos>