

Determinación del área de afectación generada por la explosión de una pipa cargada con gas LP en San Pedro Xalostoc, Edo. de México, México

Morales Hernández Daniel Medi*, Alcántara Garduño Martha Elena

Facultad de Química, Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional Autónoma de México. Av. Universidad No. 3000, Coyoacán, Ciudad de México. C.P. 04510. México.

*Autor para correspondencia: iqdanielmedi@gmail.com

Recibido:
04/mayo/2022

Aceptado:
28/noviembre/2022

Palabras clave:
Accidente con GLP,
Explosión,
Radiación térmica

Keywords:
LPG accident,
Explosion,
Thermal radiation

RESUMEN

En este trabajo se determinó el área de afectación, dentro de una zona urbana, producida por la radiación térmica y las ondas de sobrepresión generadas por la explosión de un contenedor cargado con 35,000 litros de GLP, que era transportado vía terrestre. Para la determinación del área de afectación se utilizaron ecuaciones numéricas y el software ALOHA®. Los resultados muestran que el área afectada por la radiación térmica tiene una distancia máxima de 550 metros, y que ésta se vio limitada debido a las construcciones que actuaron como barreras físicas alrededor del punto de explosión; por otro lado, las ondas de sobrepresión generaron daños en un radio de 600 metros. Los resultados obtenidos en las ecuaciones numéricas y el software ALOHA® fueron similares entre sí, mostrando que este software puede ser utilizado por los primeros respondedores para determinar las áreas afectadas, y así preparar los procedimientos de primera atención a aplicar.

ABSTRACT

This paper shows the simulation and analysis of an area affected by thermal radiation and overpressure waves generated by the explosion of a container loaded with 35,000 liters of liquefied petroleum gas (LPG) which was transported by land. Numerical equations and the ALOHA® software were used to determine the affected area. The results show that the area affected by thermal radiation has a maximum distance of 550 meters, and this was limited due to the constructions that acted as physical barriers around the point of explosion; the overpressure waves generated damage in a radius of 600 meters. The results obtained in the numerical equations and ALOHA® software were similar to each other, showing that the software can be used by the first responders to determine the affected areas, and thus prepare the first care procedures to apply.

Introducción

El gas licuado de petróleo, también conocido como gas LP o GLP, ha sido usado para fines industriales y domésticos desde los inicios del siglo XX. Descubierta como subproducto del petróleo en el año 1900, comenzó a ser utilizado inicialmente como sustituto de leña para la calefacción y la cocción. Fue utilizado inicialmente en las industrias, pero con el paso del tiempo se empezó a implementar su uso también en vehículos. La utilización generalizada en equipos de transporte fue consecuencia de la mayor disponibilidad de este combustible en los años 50's. Posteriormente, y con el posicionamiento del petróleo como combustible dominante sobre el carbón, se empezó a extender el uso de cilindros de GLP en actividades domésticas (CONUEE, 2015).

La demanda nacional mensual promedio estimada en México de gas LP es de unas 750,000 toneladas; aproximadamente el 60% corresponde al consumo doméstico (450,000 toneladas), 15% a la industria (112,500 toneladas), otro 15% a comercios y servicios, y el restante 10% (75,000 toneladas) a transporte (Juárez, 2020). Bajo el acuerdo de la Comisión Reguladora de Energía en temas de transporte y distribución, el transporte de gas LP por medios distintos a ductos comprende la actividad de recibir, entregar y, en su caso, conducirlo por medio de autotankers, semirremolques, buque-tankers o carro-tankers, sin que conlleve su enajenación o comercialización. En la Ciudad de México y área metropolitana, el transporte de gas LP está a cargo de empresas privadas que se encargan de su distribución para uso doméstico y para transporte mediante el uso de pipas y camiones distribuidores de tanques portátiles (SEGOB, 2019).

Riesgos asociados al gas LP

Entre las principales características del gas LP resalta que es muy inflamable. Su mal manejo ha provocado una serie de accidentes a nivel mundial, que en muchos casos ha ocasionado numerosas muertes, así como una afectación importante a bienes, servicios y al ambiente. El porcentaje de accidentes ocurridos en México desde 2010 a 2020 arroja los datos indicados en la Tabla 1.

Tabla 1. Reporte de accidentes en México en los últimos 10 años (CENAPRED, 2020).

Accidentes en México por Gas LP		
Urbanos	Transporte	Industriales
914	442	69
Total de Accidentes		1425

Existen 3 tipos de contingencias:

Fugas, son las emanaciones o derrames no controlados del gas LP, ya sea en forma líquida o gaseosa; el riesgo latente de una fuga es un incendio, Incendios, son fugas no controladas, provocadas por la combustión gradual del gas LP, y Explosiones, es una reacción de combustión de la mezcla gaseosa aire/gas LP que se propaga a gran velocidad.

Los materiales peligrosos en estado líquido o gaseoso, tales como los gases líquidos y los líquidos inflamables, presentan una gran diversidad de riesgos durante su transporte y almacenamiento. Si hubiere que destacar un riesgo común a todos ellos, sería el efecto del fuego sobre los recipientes o depósitos que los contienen, con independencia de que el contenido sea o no combustible. Como se trata de recipientes cerrados, el calentamiento producido por fuego o por una fuente de calor externa, puede incrementar la presión en el interior del recipiente de una manera extraordinaria y provocar su estallido.

En todos los accidentes posibles, hay que destacar dos por su importancia y su peligrosidad (Mexicogas, 2015):

BLEVE, que es una explosión por expansión del vapor de un líquido en ebullición y boilover, que es el rebosamiento de un líquido incendiado por ebullición.

Simulación del evento

ALOHA® (Areal Locations of Hazardous Atmospheres), es un programa que se utiliza ampliamente para planificar la respuesta a emergencias químicas que involucran sustancias y materiales peligrosos (EPA, 2016). Los detalles sobre una liberación real o potencial de sustancias químicas y de materiales peligrosos se pueden ingresar en ALOHA®, el cual generará estimaciones de la zona de amenaza para varios tipos de peligros. Las estimaciones de la zona de amenaza se muestran en una cuadrícula en ALOHA y también se pueden trazar en mapas en MARPLOT, ArcMap de Esri, Google Earth y Google Maps. Las zonas de amenaza son indicadas por distintos colores: la zona roja representa el nivel de peligro más elevado, y las zonas de amenaza naranja y amarilla representan áreas de amenazas decrecientes, respectivamente.

Para realizar la modelación de un evento determinado es necesario contar con los datos de masa, volumen y parámetros fisicoquímicos del material químico que ocasionó el accidente, las condiciones ambientales, topográficas y físicas del lugar del accidente, y condiciones como dimensiones y geometría del contenedor del material, entre otros factores.

Algunas de las limitaciones de ALOHA es que, al hacer estimaciones de concentración, el programa asume que la sustancia química se libera a la atmósfera y se mezcla inmediatamente, de modo que la concentración parece una curva en forma de campana a lo largo de la nube (la concentración más alta se encuentra a favor del viento a lo largo de la línea central). Sin embargo, las estimaciones de concentración de ALOHA pueden ser menos precisas cuando existe cualquier condición que reduzca la mezcla en la atmósfera.

Detalles del accidente

Mediante el análisis de información de fuentes periodísticas e instituciones gubernamentales se determinaron las causas que originaron el accidente y el alcance de los daños generados.

El 8 de mayo del 2013, aproximadamente a las 5:00 hrs, ocurrió la explosión de una pipa de doble semirremolque cargado con gas LP debido al desprendimiento de uno de los contenedores transportados por el tractocamión. El contenedor desprendido impactó contra varias casas aledañas a la autopista federal México-Pachuca, provocando la muerte de 22 personas y lesiones a otras 31; causó daños a 45 viviendas y 30 vehículos, además del desalojo de unos 100 habitantes de San Pedro Xalostoc. La onda expansiva y radiación que provocó la explosión y el BLEVE generado, respectivamente, se propagaron unos 500 metros a la redonda, calcinando vehículos que circulaban por la zona y varias viviendas, donde vivían alrededor de 180 personas, a ambos lados de la autopista (Salinas, 2013).

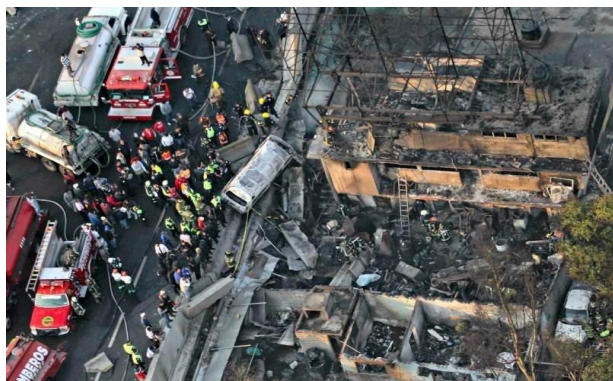


Figura 1. Daños ocasionados por la explosión, en el punto de origen (punto cero) (Fernández, 2013).

El accidente se ubicó en las coordenadas de latitud 19°32'10.91" y longitud 99°04'34.11" a 2,252 msnm. La temperatura promedio del mes y a la hora del accidente es de 12°C, con una velocidad del viento 8 km/h (2.5 m/s), con dirección preferente Noreste (NE) (Weather, 2021).



Figura 2. Sitio del accidente, San Pedro Xalostoc (Google Earth, 2021).

El volumen de gas LP transportado era de 35,000 litros. Las dimensiones de cada contenedor (cilindro) eran de 2.5 m de diámetro y longitud de 9 m; el material se encontraba contenido a una presión de 10 bar (9.87 atm) a temperatura ambiente.

Las siguientes imágenes representan la línea de tiempo que dio origen al accidente (Azteca América, 2013).



Figura 3a. Vehículo con doble contenedor a exceso de velocidad.



Figura 3b. Pérdida de control del vehículo.



Figura 4a. Desprendimiento e impacto del segundo contenedor con edificación urbana.



Figura 4b. Explosión del segundo contenedor tras la liberación del gas LP.



Figura 5a. Desplazamiento del primer contenedor a través de la vialidad debido a la onda de sobrepresión.



Figura 5b. Impacto del primer contenedor contra automoviles y casas del lado opuesto de la carretera.

La onda de sobrepresión ocasionó que el segundo contenedor saliera disparado como un proyectil a gran velocidad, lo que provocó que atravesara la autopista ocasionando daños de pérdida total a viviendas y vehículos como se muestra en las imágenes 6a y 6b.



Figura 6a. Destino final del segundo contenedor tras salir proyectado.



Figura 6b. Daños ocasionados por el segundo contenedor en casas y vehículos.

Normatividad asociada al accidente

La norma NOM-010-SEDG-2000 (SE, 2001) especifica las condiciones de seguridad, operación y mantenimiento para los vehículos encargados del transporte y distribución del gas LP, así como las medidas mínimas de seguridad que se deben observar durante su operación, pero no establece la capacitación necesaria para la operación segura de los vehículos ni las acciones de prevención y atención a siniestros que pudieran ocasionarse por su manejo.

De acuerdo con el artículo tercero de la Ley de Caminos, Puentes y Autotransporte Federal (CDHCU, 2020) se establece el derecho de vía de una carretera o camino local, la cual debe tener una amplitud absoluta de 20 metros a cada lado del eje del camino, la cual podrá ampliarse en los lugares en que esto resulte indicado por las necesidades técnicas de la vía, como puede ser la densidad del tránsito o por otras causas. La misma ley, en su artículo cuarto, establece que la Junta Local de Caminos será la dependencia oficial que fijará la amplitud del Derecho de Vía, de acuerdo con las necesidades técnicas del camino.

Objetivos

Determinar a través de ecuaciones numéricas y el software ALOHA®, el área de afectación ocasionada por la onda de sobrepresión y el BLEVE generados por la explosión de un contenedor cargado con 35,000 litros de gas LP en la zona urbana San Pedro Xalostoc, Edo. de México, el 8 de mayo de 2013.

Comparar los resultados obtenidos entre ecuaciones numéricas, el software ALOHA® y los daños reales causados por la explosión, utilizando para esta comparación el área afectada y lo reportado en notas periodísticas.

Determinar las omisiones operativas que originaron la explosión de una pipa con 35,000 litros de gas.

Metodología

Modelación numérica del accidente

Para la selección de las ecuaciones más apropiadas para modelar el comportamiento de la onda de sobrepresión y el BLEVE originados por la explosión de una pipa cargada con gas LP, se consideraron las características físicas y químicas del material involucrado, así como las condiciones geográficas y meteorológicas del sitio del accidente, entre otros factores. Las ecuaciones utilizadas en la modelación son las indicadas en la Tabla 2.

Tabla 2. Ecuaciones usadas para determinar parámetros del BLEVE (Bariha *et al.*, 2016).

Parámetro	Modelo de Punto de Partida (Pieters <i>et al.</i> , 1985)
Diámetro Máximo, D_{Max} [m]	$6.48M^{0.325}$
Diámetro Inicial, D_i [m]	$1.33D_{Max}$
Tiempo de Duración, T_b [s]	$0.852M^{0.26}$
Altura, H_b [m]	$0.75D_{Max}$
Longitud de Trayectoria, X [m]	$\sqrt{H_b^2 + X^2}$
Factor de Visión, F_{view} [adimensional]	$\frac{(D_{Max}/2)^2}{X^2}$
Transmisividad Atmosférica, τ_a	$\tau_a = 2.02[P_w(X - R)]^{-0.09}$
Flujo de Calor en la Superficie, SEP_{max} [kW/m ²]	$SEP_{max} = F_s m' \Delta H_c$
Radiación de Calor recibido por las personas, I [kW/m ²]	$I = \frac{2.2\tau_a F_{view} \Delta H_c M^{2/3}}{4\pi X^2}$

Cálculo de la dosis de radiación térmica

El efecto de la radiación térmica emitida por la bola de fuego (*Fireball*) generada por la combustión del gas LP puede provocar quemaduras de distintos grados o incluso la muerte. Para estimar el tipo de quemadura producida y número de personas que pueden morir por la exposición al calor generado, se emplea el término "dosis de radiación térmica" el cual representa el porcentaje de probabilidad de recibir alguno de los efectos de quemaduras de primer o segundo grado, o bien morir por la radiación térmica recibida (Bariha *et al.*, 2016):

$$P_r = a + b * \ln D$$

En la ecuación anterior, D es el flujo de calor experimentado a diferentes distancias multiplicado por el tiempo de duración del *Fireball*, P_r es el porcentaje de probabilidad de recibir la dosis de radiación térmica, a y b son constantes determinadas por el tipo de quemadura que se puede experimentar y sus valores se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Constantes para el cálculo de la "dosis de radiación térmica" (Van den Bosch *et al.*, 2005).

Efecto	a	b
Quemadura de 1er grado	-39.83	3.0186
Quemadura de 2do grado	-43.14	3.0186
Muerte	-36.38	2.56

Estimación de los efectos de la sobrepresión

El método usado para la estimación de los efectos de la sobrepresión es el método de equivalencia de TNT, el cual se basa en los efectos de sobrepresión que causaría la masa equivalente de trinitrotolueno (TNT) partiendo de la siguiente ecuación (Crowl y Louvar, 2002):

$$m_{TNT} = \frac{nM\Delta H_c}{\Delta H_{TNT}}$$

En donde m_{TNT} es el equivalente en masa de TNT (kg), n es la eficiencia de explosión, M es la masa de gas LP (kg), ΔH_c es la entalpía de combustión del gas LP (kJ/kg) y ΔH_{TNT} es la entalpía de combustión del trinitrotolueno.

Es necesario establecer una distancia escala, Z_e (m/kg^{1/3}), la cual se estima desde el punto de origen del accidente hasta una distancia X (m).

$$Z_e = \frac{X}{(m_{TNT})^{1/3}}$$

La sobrepresión puede ser calculada mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{p_o}{p_a} = \frac{1616 * (1 + \frac{Z_e}{4.5})^2}{\sqrt{1 + (\frac{Z_e}{0.048})^2} * \sqrt{1 + (\frac{Z_e}{0.32})^2} * \sqrt{1 + (\frac{Z_e}{1.35})^2}}$$

En donde p_o es la sobrepresión máxima (bar) y p_a es la presión ambiental (bar).

Modelación del evento usando ALOHA

El software ALOHA® se utilizó para simular los eventos de interés (onda de sobrepresión y radiación térmica). Las áreas de afectación fueron usadas en el software Google Earth® para superponerlas en un mapa aéreo, y así comparar con los resultados de los cálculos numéricos con el área real afectada.

La metodología que se siguió para obtener los resultados consistió en establecer la ubicación exacta del accidente y el entorno en el que se encontraba. A continuación, se definieron los valores fisicoquímicos y toxicológicos, entre otros, del químico que se vio involucrado.

Se usaron como datos la información meteorológica en el momento del accidente y las características físicas del recipiente que contenía al gas LP. Se estableció en ALOHA® que el tipo de evento generado fue un BLEVE, considerando que el recipiente contiene únicamente líquido por las condiciones de presión y temperatura de almacenaje.

Resultados y discusión

Resultados de la modelación utilizando ecuaciones numéricas.

Dimensión, duración y altura del Fireball

La correlación propuesta por Roberts (Roberts, 1981) para el cálculo del diámetro del Fireball es calculado como:

$$D_{Max} = 6.48M^{0.325}$$

En donde D_{Max} es el diámetro máximo del fireball (m) y M es la masa de gas LP (kg).

$$M = V(l) * \frac{1 m^3}{1000 l} * \rho_{GLP} = 35,000 l * \frac{1 m^3}{1000 l} * 517 \frac{kg}{m^3} = 18,095 kg$$

$$D_{Max} = 6.48 * M^{0.325} = 6.48 * (18,095 kg)^{0.325} = 157 m$$

El tiempo de duración del fireball, T_b (s), se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$T_b = 0.852M^{0.26}$$

$$T_b = 0.852 * M^{0.26} = 0.852 * (18,095kg)^{0.26} = 10.9 s$$

La altura máxima del fireball, H_b (m), se determinó como:

$$H_b = 0.75D_{Max}$$

$$H_b = 0.75 * D_{Max} = 0.75 * (157m) = 118 m$$

Flujo de calor

Los datos de la Gráfica 1 representan el flujo de calor recibido a diferentes distancias desde el punto de origen del accidente.

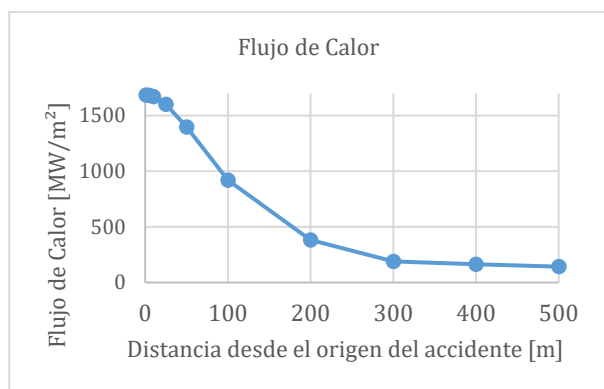


Figura 7. Flujo de calor irradiado por la explosión del contenedor con gas LP a distintas distancias desde el origen de la explosión.

Efecto de la radiación térmica

La radiación térmica recibida por las personas depende de la distancia desde el origen de la explosión y del poder emisor de la superficie del Fireball. La Gráfica 2 representa el flujo de calor recibido calculado a varias distancias desde el punto inicial de la explosión.

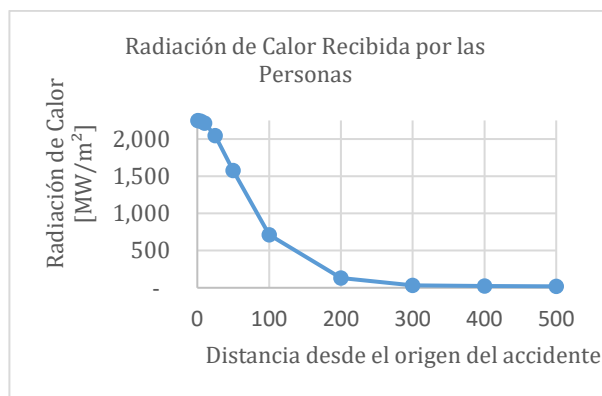


Figura 8. Radiación de calor recibido por las personas por la explosión del contenedor con gas LP a distintas distancias desde el origen de la explosión.

Dosis de radiación térmica

La gráfica 3 muestra, como probabilidad de ocurrencia, la dosis de radiación térmica, que puede ocasionar quemaduras de primero y segundo grado o la muerte a diferentes distancias desde el origen del accidente.

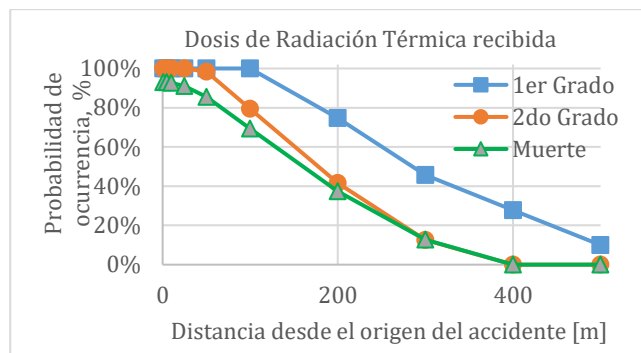


Figura 9. Efecto de la radiación térmica emitida por el fireball provocando quemaduras o la muerte por la explosión del contenedor con gas LP a distintas distancias desde el origen de la explosión.

De acuerdo con la Gráfica 3, a cualquier distancia menor a 10 metros, la cantidad de radiación emitida por la explosión tiene la capacidad de ocasionar la muerte en un 90%, y quemaduras de primer y segundo grado en un 100%. Hasta una distancia de 100 metros, la probabilidad de muerte es del 70%, la probabilidad de experimentar una quemadura de segundo grado es del 70% y la probabilidad de exponerse a una quemadura de primer grado es del 100%. Solo hasta una distancia de 500 metros, la probabilidad morir o tener una quemadura de segundo grado es del 0%, mientras que exponerse a una quemadura de primer grado es del 10%.

Estimación de los efectos de sobrepresión

La Gráfica 4 muestra la sobrepresión experimentada a diferentes distancias a causa de la explosión del contenedor de gas LP.

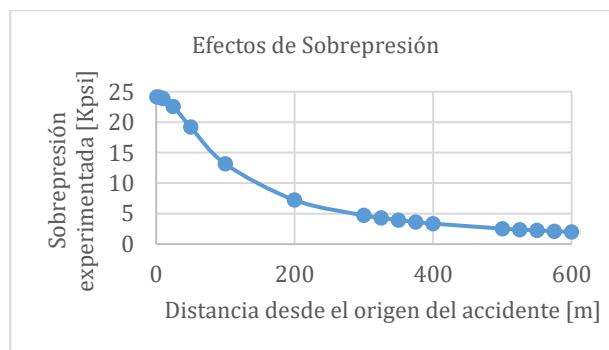


Figura 10. Efecto de la sobrepresión a distintas distancias desde el punto de origen del accidente.

Resultados de la modelación utilizando ALOHA.

Dimensión, duración y altura del fireball.

ALOHA® determina automáticamente las dimensiones del Fireball utilizando los datos de las condiciones atmosféricas del sitio y fisicoquímicas del material involucrado, así como los datos del recipiente. En la Imagen 7 se muestran los datos usados en la simulación y los resultados obtenidos por ALOHA® para las áreas de amenaza determinadas considerando la generación de un BLEVE.

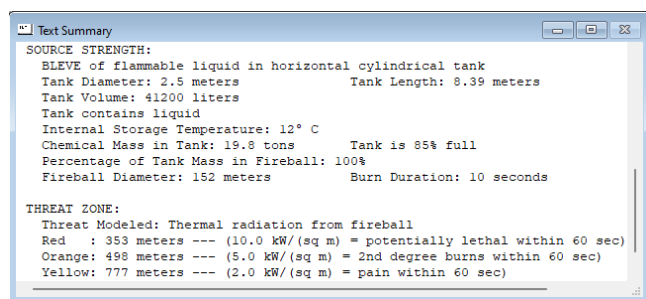


Figura 11. Resultados de dimensionamiento y duración del fireball y zonas de amenaza por radiación térmica por la explosión de gas LP en un BLEVE.

Efecto de la radiación térmica

La zona de amenaza por radiación térmica debido a la explosión del gas LP se muestra en la Imagen 8. Los cálculos con ALOHA® muestran que hasta una distancia de 353 metros se experimentaría una radiación térmica tal que podría causar la muerte; entre una distancia de 353 a 498 metros se experimenta una quemadura de segundo grado, y entre 498 y 777 se está expuesto a una quemadura de primer grado.

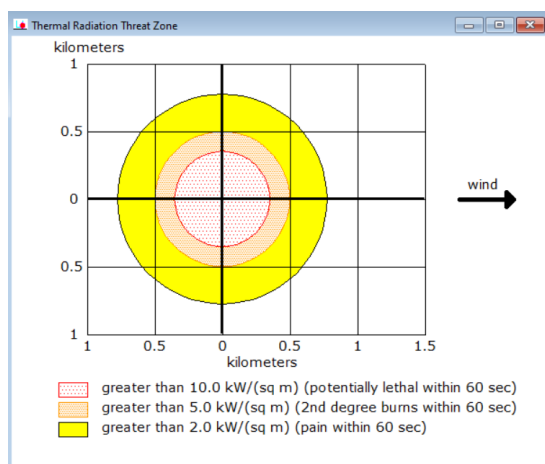


Figura 12. Zonas de amenaza por radiación térmica por la explosión de gas LP.

El nivel de afectación para distintas distancias (zonas de amenaza) desde el punto de origen del accidente es trasladado a Google Earth® (Imagen 9) para identificar el daño que que ocasionó la explosión a distintas estructuras.



Figura 13. Datos de las zonas de amenaza trasladadas a Google Earth®.

Con los datos usados en ALOHA® para determinar las zonas de amenazas, se estableció que el gas LP escapó a la atmósfera por la ruptura del contenedor generando una explosión posterior a la generación de la nube de gas.

La Imagen 10 muestra los resultados de la simulación de las ondas de sobrepresión generadas por la explosión del gas LP, donde a una distancia de hasta 83 metros la sobrepresión es capaz de provocar la destrucción de edificaciones y estructuras; hasta una distancia de 135 metros la sobrepresión ocasiona posibles lesiones graves a los seres vivos, y hasta una distancia de 328 metros la sobrepresión ocasiona el estrellamiento de vidrios.

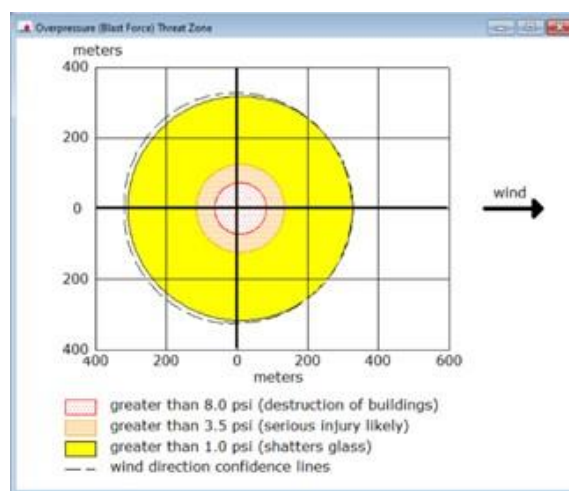


Figura 14. Simulación del área de afectación (zona de amenaza) por ondas de sobrepresión desde el punto de origen del accidente.

Omisiones normativas y operativas que causaron el accidente

Imprudencia al manejo y nula aplicación de la normatividad.

Las acciones que dieron origen al accidente fueron dos principalmente:

En primera instancia, el conductor del tractocamión que transportaba el gas LP circulaba a exceso de velocidad, lo cual incumple el artículo 39 de la Ley de Caminos, Puentes y Autotransporte Federal (CDHCU, 2020); al tratarse de un vehículo de doble semirremolque transportando material inflamable, el conductor del tractocamión no pudo reaccionar de forma correcta cuando se incorporó a su carril de manera imprudente una camioneta de transporte público, por lo que el conductor del autotransporte perdió el control de su vehículo.

La NOM-010-SEDG-2000 (SE, 2001) establece que debe existir “un programa de capacitación al personal y su cumplimiento para la prevención y atención a siniestros”, acciones que no fueron aplicadas en este accidente.

Tras la ampliación de la carretera México-Pachuca, el gobierno no retiró las viviendas situadas a un lado del tramo carretero, con el fin de respetar la distancia establecida por derecho de vía (20 metros) entre las edificaciones y la vía de circulación. Esto origina que al ocurrir el accidente los efectos de la explosión afectarán de manera inmediata a las personas y construcciones ubicadas a un lado de la carretera. El contar con la distancia del derecho de vía hubiera reducido la probabilidad de que el tanque desprendido colisionará directamente con las viviendas, y por tanto las afectaciones resultantes. El no respetar el derecho de vía establecido por la normatividad incrementa el riesgo al cual se encuentran expuestas las personas que habitan en las áreas cercanas.

Conclusiones

Los datos de simulación mediante ALOHA® y cálculos algebraicos fueron comparados con los daños reales de acuerdo a los registros fotográficos existentes, concluyéndose que:

El origen del accidente fue ocasionado por la imprudencia del conductor al manejar a alta velocidad y no aplicarse la distancia mínima de 20 metros del derecho de vía en el tramo carretero afectado.

El área de afectación máxima obtenido por ALOHA® es de 777 metros, mientras que con los cálculos algebraicos se determinó una distancia de 600 metros. En los

reportes periodísticos, el área de afectación se limitó a aproximadamente 200 metros, lo cual se debió a la contención que ejercieron los edificios cercanos y la cuneta de la carretera en los efectos de las ondas de sobrepresión y radiación térmica, es decir, los edificios actuaron como barreras de protección.

Los resultados del área de afectación por el BLEVE obtenidos por ALOHA® son similares a los datos reales provocados en el accidente, y muestran mayor precisión que los obtenidos mediante cálculos algebraicos. Los resultados de ALOHA® sobre el efecto de radiación térmica en seres vivos es similar a las consecuencias reales reportadas para quemaduras de primero y segundo grado y probabilidad de muerte. Por ello, ALOHA® es recomendable para la estimación de las consecuencias originadas por este tipo de eventos y que puedan ser utilizadas para la planeación de acciones de primera respuesta que lleva a cabo el personal de emergencias en minutos posteriores al accidente.

Referencias

- Azteca América. (2013). Recreación de los hechos, sobre explosión de pipa de gas en Xalostoc. México. Recuperado el 18 de febrero del 2022 de https://www.youtube.com/watch?v=WA7tqOGSk7s&ab_channel=AztecaAmerica.
- Bariha N., Mani M., Chandra S. (2016). Fire and explosion hazard analysis during surface transport of liquefied petroleum gas (LPG). *J. Loss Prev. Process Ind.* (40): 452-453.
- Bosch C.J.H. (2005). TNO. Methods for the calculation of physical effects due to releases of hazardous materials (liquids and gases). Report CPR 14E, 3raEd., 2daRev.
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres) (2020). Infografía Gas LP, Evita Accidentes. Secretaría de Gobernación. México. Recuperado el 6 de julio del 2021 de <https://www.gob.mx/cenapred/documentos/infografia-gas-lp>.
- CDHCU (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión). (2020). Ley de Caminos, Puentes y Autotransporte Federal. Cámara del H. Congreso de la Unión. México. Diario Oficial de la Federación, 1 de diciembre de 2020. México.
- CONUEE (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía) (2019). Gas Licuado de Petróleo, Gas LP. Secretaría de Gobernación. México. Recuperado el 26 de julio del 2021 de <https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/transporte/fichastecnicas/gasLP.pdf>.

Crowl, D.A., Louvar, J.F., 2002. Chemical Process Safety: Fundamentals with applications, second ed. Prentice Hall International Series in the Chemical Engineering Sciences, New Jersey, 263-269.

Dhurandher B.K., Ravi K., Amit D. (2015). Impact Assessment of Thermal Radiation Hazard from LPG Fireball. *Procedia Earth and Planetary Science*. 2015 (11): 499-506.

GRE (Guía de Respuesta en caso de Emergencia), 2020. Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration. U.S. Department of transportation, Transport Canada, Secretaría de Comunicaciones y Transportes. 167-168. 367-368.

Juárez U. (2020). Se recupera consumo nacional de gas LP: AMEXGAS. *Energía a Debate*. México. Recuperado el 26 de julio del 2021 de <https://www.energiaadebate.com/downstream/se-recupera-consumo-nacional-de-gas-lp-amexgas/>.

Mexicogas. (2019). Accidentes en el transporte y almacenamiento de gas L.P. México. Recuperado el 10 de enero del 2022, de <http://mexicogas.net/wp/2015/01/28/riesgos-en-el-manejo-del-gas-l-p/>.

Roberts A. (1981). Thermal radiation hazards from release of LPG pressurized storage. *Fire Staf*. 40, 197-212.

Salinas C.J. (2013). Tragedia en Ecatepec, 22 muertos y 31 heridos. *Periódico La Jornada*. México. Recuperado el 13 de julio del 2021 de <https://www.jornada.com.mx/2013/05/08/politica/002n1pol>.

Secretaría de Energía. (2001). Norma Oficial Mexicana, valoración de las condiciones de seguridad de los vehículos que transportan, suministran y distribuyen gas L.P., y medidas mínimas de seguridad que se deben observar durante su operación. Recuperado el 18 de febrero del 2022 de <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/secre/sedg010.pdf>.

SEGOB (Secretaría de Gobernación) (2019). Acuerdo de la Comisión Reguladora de Energía. *Diario Oficial de la Federación*. México. Recuperado el 26 de julio del 2021 de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5548541&fecha=22/01/2019.

Pieterse M., Huerta C., Bonilla J.M. (1985). Analysis of LPG Incident in San Juan AH, Apeldorn, The Netherlands.

US EPA (2013). ALOHA (Area locations of hazardous atmospheres) Environmental Protection Agency (EPA). Technical documentation, Seattle, Washington, EUA. Recuperado el 22 de septiembre del 2021 de <https://www.epa.gov/cameo/aloha-software>.

Weather (2021). IBM Business. EUA. Recuperado el 28 de julio del 2021 de <https://weather.com/es-MX/tiempo/hoy/l/MXDF0132:1:MX?Goto=Redirected>.