

Estimación de distancias de seguridad ante explosiones de nube de vapor (VCE) tras fugas de GLP

Estimation of safety distances against vapor cloud explosion (VCE) after LPG leaks

Constanza Morbidoni, Santiago Orellano, Romina Kraft

CAIMI Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Zeballos 1346, S2000BQA Rosario, Argentina.

constanzamorbidoni@gmail.com; santiago.orellano93@gmail.com;
romina.kraft@hotmail.com

Resumen

La dispersión de gases pesados plantea importantes riesgos ambientales y de exposición humana. La modelización de este fenómeno permite estimar la concentración en los puntos circundantes al punto de la fuga y definir las zonas explosivas. En este trabajo se analizan las consecuencias ocasionadas por fugas de Gas Licuado de Petróleo (GLP) seguida de una explosión de nube de vapor considerando diferentes escenarios con el objetivo de obtener correlaciones sencillas para la estimación de distancias de seguridad. Luego de un análisis de sensibilidad, se proponen funciones de la distancia de seguridad con el caudal fugado y la velocidad de viento para diferentes estabildades atmosféricas. Los parámetros del modelo son determinados mediante un modelo de optimización implementado en GAMS. Un modelo sencillo y preciso para la estimación de la distancia de seguridad dada una fuga de GLP fue obtenido.

Palabras clave

Gases pesados, Explosión de nube de vapor, Distancias de seguridad, GLP.

Abstract

The dispersion of heavy gases present significant environmental and human exposure risks. Modeling this phenomenon makes it possible to estimate the concentration in the points surrounding the leak point and define the explosive zones. In this work, the consequences caused by leaks of Liquefied Petroleum Gas (LPG) followed by a vapor cloud explosion are analyzed considering different scenarios with the aim of obtaining simple correlations for the estimation of safety distances. After a sensitivity analysis, functions of the safety distance with the leaked flow and the wind speed are proposed for different atmospheric stabilities. The model parameters are determined by an optimization model implemented in GAMS. A simple and precise model for the estimation of the safety distance given an LPG leak was obtained.

Keywords

Heavy gases, Vapor cloud explosion, Safety distances, LPG.

Introducción

En la industria de procesos, las explosiones son una de las causas más frecuentes de eventos accidentales en cadena (efecto dominó). Dentro de ellas, se han manifestado diferentes explosiones de nube de vapor (VCE por sus siglas en inglés), como la explosión de Puerto Rico (2009), la explosión de Sitapura, India (2009) y la explosión de Amuay, Venezuela (2012), entre otras. La catástrofe de Amuay causada por una gran VCE en una refinería situada en el noroeste de Venezuela, provocó más de 50 víctimas mortales y más de 100 heridos, dañó 1.600 viviendas y ocasionó pérdidas financieras de hasta 1.000 millones de dólares. (Chen et al., 2020)

Dado el gran número de variables estocásticas que intervienen en la dinámica de formación e ignición de la VCE, éste normalmente es el evento accidental más complejo desde la perspectiva del modelado. Las principales complejidades surgen de la incertidumbre en la definición de la posición de la fuente de ignición, del lapso de tiempo transcurrido entre el comienzo de la fuga y la explosión (ignición retardada), de la complejidad asociada al cálculo de la sobrepresión, siendo factores de importancia el confinamiento y la congestión en el lugar del evento. Para simplificar esta cadena estocástica, los métodos de análisis de riesgos generalmente suponen que la explosión ocurre inmediatamente en el lugar de la fuga. La ubicación de este tipo de evento depende de la dispersión de la sustancia liberada al ambiente (formación de una nube con una concentración por encima del LEL -límite inferior de explosividad- y por debajo del UEL - límite máximo de explosividad-) y la posible presencia de la fuente de ignición, que puede encontrarse dentro o fuera de la planta química en cuestión. Reunidas estas condiciones ocurre la explosión, consistiendo en una rápida expansión de las llamas generando un campo de sobrepresión/ onda de choque, lo que provoca efectos perjudiciales, pudiendo afectar grandes áreas y causar graves consecuencias: múltiples víctimas mortales y grandes daños materiales y ambientales. La vulnerabilidad de las instalaciones depende de la intensidad de la sobrepresión causada por la VCE siendo relevante la evolución espacio – tiempo de las nubes de vapor antes de la ignición. (Alghamdi, 2011)

Considerando esto, en este trabajo se pretenden obtener modelos simples para estimar distancias de seguridad en función de pocas variables de fácil acceso con la finalidad de aplicarlos en el diseño de planes de evacuación, diseño y optimización de layout de planta. La disponibilidad de estos modelos constituye una valiosa herramienta para la gestión del riesgo tanto en la esfera privada (puertas adentro de la industria) como en la pública (en el planeamiento territorial y el diseño de planes de evacuación).

El proceso para el desarrollo de modelos simples para la estimación de distancias de seguridad se explicará a continuación.

Metodología

Para la modelización de la dispersión se trabajó con el modelo DEGADIS (Dense Gas Dispersion Model) ya que es uno de los modelos más rigurosos y exactos de la dispersión de gases pesados. En cuanto al cálculo de la onda choque se empleó el método Baker-Strehlow-Tang (Chen et al., 2020).

Con el objetivo de definir el modelo reducido para la estimación de distancias de seguridad, en primer lugar, se realizó un análisis de sensibilidad de las variables de entrada más influyentes en

la dispersión del gas inflamable. Luego de este análisis se consideró el desarrollo de un modelo simplificado del tipo: $L=f(q_s, E, v)$. Siendo q_s el caudal fugado, E la estabilidad atmosférica y v la velocidad del viento. En secciones posteriores se incluye un análisis de sensibilidad de las variables no consideradas como variables de entrada en el modelo reducido.

Se definió como escenario accidental la fuga de GLP almacenado a presión considerando distintos caudales liberados a la atmósfera. Con el objetivo de generar una hipermatriz de datos base para el desarrollo del modelo reducido, se parametrizaron los intervalos de aplicación de las variables de entrada. En este contexto, el intervalo de aplicación del caudal fugado fue de 1.146 a 10.31 kg/s (los valores evaluados se incluyen en la tabla 1). Este rango de evaluación se define considerando la frecuencia de accidentes de este tipo en la industria (Lloyd's Register Consulting, 2016). Para el análisis del fenómeno de dispersión se consideraron tres velocidades de viento, según la tabla 1 y, tomando en cuenta para cada una tres estabildades atmosféricas. Como se mostrará más adelante, las restantes variables meteorológicas no presentan una incidencia significativa en los resultados. A partir de esto, se adoptaron los siguientes valores fijos: temperatura ambiente (25°C), humedad relativa (50%) y rugosidad del suelo (0,1 cm). En cuanto a la evaluación de la onda de choque generada por una potencial VCE, se contemplaron tres niveles de congestión: baja, media y alta.

Variable de entrada	Unidades	Parametrización
q_s	kg/s	1,146; 2,578; 4,583; 7,16; 10,31
V	m/s	2; 5; 8
Estabilidad	-	Extremadamente inestable (A o B) Neutra (C) Muy estable (D o E)

Tabla 1. Variables de entrada

Simulación de la dispersión

Para estimar la distribución de concentración de GLP se ejecutó DEGADIS considerando las propiedades del propano. Éste permite modelar la dispersión de gases pesados. De hecho, los ejecutables desarrollados por la EPA (Environmental Protection Agency) permiten estimar las curvas de iso-concentración de gases pesados dada una fuga. En particular, a partir de su ejecución, es posible determinar la masa en la nube por encima de un nivel de concentración determinado. Considerando la combinación de los escenarios evaluados (5 caudales de fuga, 3 velocidades de viento y 3 estabildades atmosférica) se obtuvieron, en primera instancia: la masa de la nube de vapor (por encima del límite inferior de explosividad), la distancia desde la fuga al punto donde se alcanza la concentración límite superior de explosividad (UEL: 95000 mg/ml) y la distancia desde la fuga hacia la concentración límite inferior de explosividad (LEL: 21000 mg/ml) - variables de importancia para la implementación del modelo de sobrepresión -.

Simulación de la onda de choque

En este trabajo, consideramos un valor significativo de sobrepresión de 20 kPa para caracterizar la vulnerabilidad de las personas, y empleando los resultados obtenidos en la etapa anterior se estimaron las distancias de seguridad (distancia en la que se presenta ese nivel de sobrepresión) por medio de la implementación del método Baker-Strehlow-Tang en el software SciLab usando

los tres niveles de congestión (baja, media, alta). Las variables de entrada al método Baker-Strehlow-Tang incluye la distancia desde la fuente, obteniéndose como variable de salida a la sobrepresión. El modelo se ejecuta mediante aproximaciones sucesivas de modo de obtener la distancia de seguridad hacia donde se garantiza el nivel de sobrepresión definido. La metodología para la obtención de las distancias seguras se implementó según el diagrama de bloques de la Figura 1.

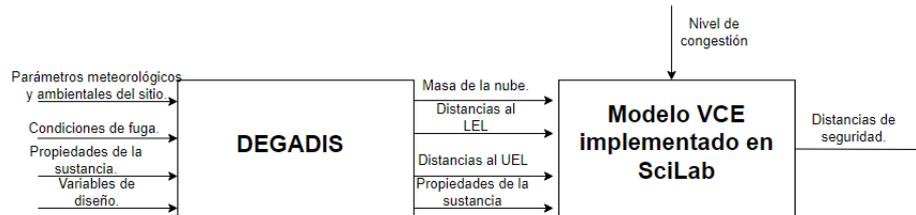


Figura 1. Esquema de la metodología empleada para obtener distancias seguras.

Con el objetivo de analizar la influencia de las variables no consideradas en el modelo, se realizó un análisis de sensibilidad de la influencia de estas. Metodológicamente, se modificaron los valores de entrada de la temperatura ambiente y humedad relativa en un 10% por encima y por debajo del valor considerado originalmente, y los valores de rugosidad según la descripción del terreno obtenida en DEGADIS (0,03 cm y 0,25 cm), considerando las estabildades atmosféricas extremas y una velocidad de viento de 2 m/seg (peor escenario). Con estos nuevos valores de salida del modelo DEGADIS (masa de la nube por encima del LEL, y distancias al UEL y LEL), se implementó el modelo desarrollado en SciLab para obtener las distancias seguras correspondientes.

De igual manera se pudo concluir que la humedad del aire no es un factor que afecte significativamente la estimación de distancias de seguridad. Sin embargo, ésta presenta una influencia significativa en la dispersión de contaminantes que reaccionan con el vapor de agua contenido en la atmósfera o en la absorción de radiación térmica, no siendo significativamente influyente en el caso de explosiones de nubes de vapor de GLP (Casal, 2018).

La influencia de la variación en la temperatura ambiente y la rugosidad en las distancias de seguridad se muestra en las Figuras 2 y 3.

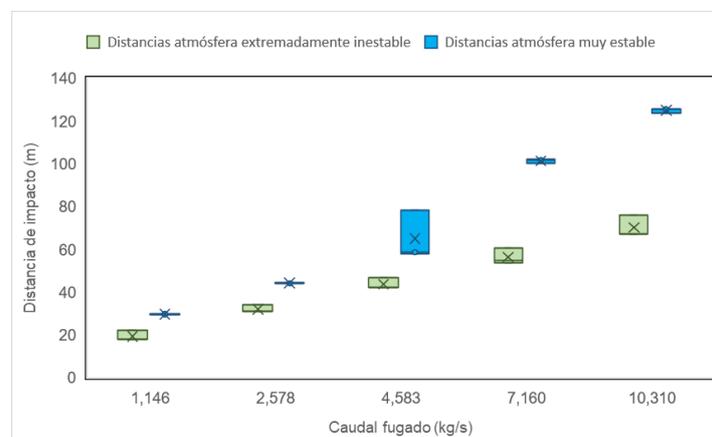


Figura 2. Análisis de sensibilidad para la temperatura ambiente.

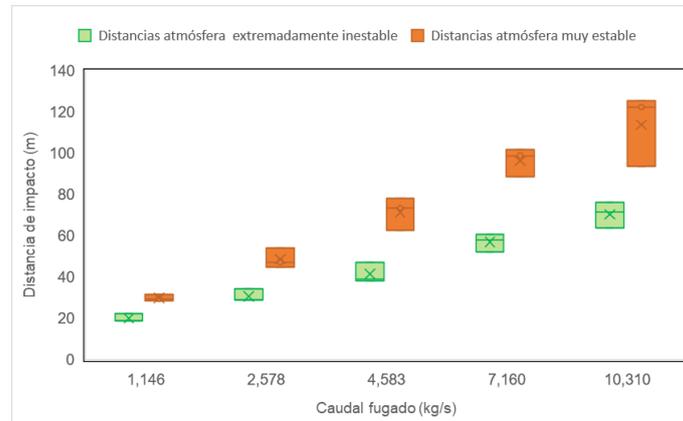


Figura 3. Análisis de sensibilidad para la rugosidad del suelo.

Si bien se obtendrían valores de distancias ligeramente diferentes variando los valores de entrada de temperatura ambiente y rugosidad, se puede ver en las gráficas que la variación no sería tan significativa por lo que no se tuvieron en cuenta como variables en el análisis para obtener la correlación simplificada. Sin embargo, considerando que el objetivo es estimar distancias seguras, se utilizaron los valores de estas variables que arrojan los resultados más conservadores de distancias de seguridad, con la desventaja inherente de sobreestimar en ciertos casos la distancia de seguridad.

En base a los valores de distancias obtenidos para los distintos escenarios considerados se encontró una buena aproximación mediante la utilización de funciones potenciales, por lo que se propuso la Ec. 1 con parámetros a determinar (A, B y C) para cada estabilidad atmosférica. Teniendo como únicas variables de entrada: velocidad del viento (V) y caudal fugado (q_s).

$$d = AV^B q_s^C \quad (1)$$

Para obtener los valores de los parámetros se desarrolló un modelo de optimización en GAMS según las ecuaciones 2 a 5. La función objetivo adoptada -ec. 2 - representa al coeficiente de correlación R^2 . El modelo se restringió, imponiendo la sobreestimación de las distancias seguras estimadas por el modelo simplificado (errores relativos positivos) -visión conservadora- (ec. 4). El modelo de optimización fue resuelto mediante la utilización de valores decrecientes del parámetro δ hasta que el instante anterior en que el modelo se vuelve infactible.

$$\text{MAX. } r^2 = 1 - \frac{\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (d_{ij}^{\text{DEG+BAKER}} - d_{ij}^{\text{RED}})^2}{\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (d_{ij}^{\text{DEG+BAKER}} - d_m^{\text{DEG+BAKER}})^2} \quad (2)$$

$$d_{ij}^{\text{RED}} = AV_i^B q_s_j^C \quad (3)$$

$$d_{ij}^{\text{RED}} \geq d_{ij}^{\text{DEG+BAKER}} \quad (4)$$

$$d_{ij}^{RED} \leq d_{ij}^{DEG+BAKER} + \delta \quad (5)$$

Donde I y J son dos conjuntos que representan los diferentes valores de velocidad de viento y caudal considerados. $d_{ij}^{DEG+BAKER}$ son los valores de distancias de seguridad obtenidas mediante la ejecución de DEGADIS y del modelo de Baker. d_{ij}^{RED} es la variable que representa la distancia estimada con el modelo reducido desarrollado, y $d_m^{DEG+BAKER}$ representa la media de las distancias estimadas con el modelo *DEGADIS+BAKER*.

Resultados y discusiones

De los tres niveles de congestión considerados (medio, bajo y alto), con los niveles medio y alto se evidenciaron los mismos resultados mientras que con un nivel bajo no se obtuvieron resultados, ya que en condiciones de bajo confinamiento (aun dándose las condiciones de concentraciones y el punto de ignición) no se manifiesta una VCE sino un flash fire puesto que no existe una aceleración del frente de llama. Los modelos simples que se obtuvieron, junto con el valor del coeficiente de correlación se muestran en la Tabla 2.

	A	B	C	R ²
Extremadamente inestable	27,812	-0,437	0,600	0,910
Neutra	27,253	-0,363	0,659	0,956
Muy estable	39,232	-0,484	0,674	0,954

Tabla 2. Resultados del problema de optimización

A continuación, en la figura 4 se muestra la comparación entre las distancias seguras estimadas por el método de referencia (D_R -DEGADIS+BAKER-) y las obtenidas por el modelo simple (D_C) para una atmósfera estable.

Se observa una disminución de la distancia de impacto con la velocidad del viento, lo que resulta lógico si se analiza el fenómeno de dispersión del gas. Al disminuir la velocidad del viento, la componente advectiva en la dispersión del propano es significativamente menor. Esto genera que una mayor masa de propano se mantenga en la nube con concentraciones superiores al LEL y, por lo tanto, una mayor energía involucrada en la explosión; con el consecuente aumento en la distancia de seguridad. Bajo la misma lógica puede analizarse la influencia de la estabilidad atmosférica. Mientras más estable sea la atmósfera, mayor será la distancia de seguridad. La influencia del caudal liberado resulta evidente. Mientras mayor sea el caudal, mayor será la distancia de impacto puesto que más masa estará involucrada en la explosión.

Observando la comparación entre las distancias obtenidas por el método de referencia (D_R) y las calculadas con el modelo simple aquí obtenido (D_C) se puede concluir que este último presenta un adecuado ajuste.

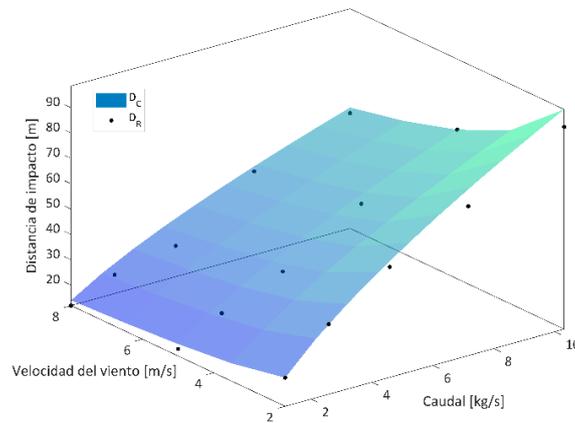


Figura 4. Distancias estimadas por el método de referencia vs las estimadas por la correlación simple.

Conclusiones

A lo largo de este trabajo se ha presentado un método para el desarrollo de modelos simples para la estimación de distancias de seguridad dado el evento de explosión de nube de vapor de un gas denso. En particular, se ha desarrollado un modelo reducido para la estimación de distancias seguras ante escenarios de VCE de GLP. El mismo dependiente de solo dos variables (caudal fugado y velocidad del viento). Dada la complejidad del fenómeno estudiado, tales modelos reducidos constituyen una herramienta de suma utilidad en el desarrollo de planes de evacuación, y particularmente en su implementación en el diseño. De hecho, es factible su incorporación en modelos de optimización de layout.

Obsérvese que desde la perspectiva determinística en que fue abordado el desarrollo del modelo reducido, se paga el precio de la sobreestimación en aquellas variables no consideradas. En futuros trabajos se buscará implementar el método Montecarlo para la generación de escenarios aleatorios, realizándose un análisis estadístico de los resultados para la determinación de las distancias de seguridad ante explosiones de nube de vapor.

Reconocimientos

Este trabajo fue realizado en el marco del proyecto UTI5217TC “Estrategias de Modelado de Procesos bajo la Filosofía de Diseño Inherentemente Seguro” en el Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería (CAIMI), de la UTN-Rosario.

Bibliografía

- Alghamdi, S.S.S., 2011. DEVELOPMENT OF A VAPOR CLOUD EXPLOSION RISK ANALYSIS TOOL USING EXCEEDANCE METHODOLOGY.
- Casal, J., 2018. Atmospheric Dispersion of Toxic or Flammable Clouds, in: Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants (Second Edition). Elsevier B.V., Amsterdam, Netherlands, pp. 269–329.
- Chen, C., Khakzad, N., Genserik, R., 2020. Dynamic vulnerability assessment of process plants with respect to vapor cloud explosions 200. <https://doi.org/10.1016/j.res.2020.106934>
- Lloyd’s Register Consulting, 2016. Process leak for offshore installations frequency assessment model - PLOFAM 492.