



Identificación del Trabajo	
Área:	Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
Categoría:	Alumno
Regional:	Rosario

Estimación de distancias de seguridad de explosión tipo BLEVE a partir de funciones convexas.

Romina KRAFT

C.A.I.M.I. - Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería (Zeballos 1346, Rosario), Facultad Regional Rosario, UTN.

E-mail de contacto: romina.kraft@hotmail.com

Este trabajo ha sido realizado bajo la dirección de la Dra. Patricia Mores y el Dr. Nicolás Scenna, en el marco del proyecto "UT15217TC - Estrategias de Modelado de Procesos bajo la Filosofía de Diseño Inherentemente Seguro" (2019-2022).

Resumen

La manipulación de sustancias peligrosas en el sector industrial ha ocasionado gran cantidad de accidentes catastróficos. En este sentido, la obtención de una metodología cuya aplicación contribuya a la mitigación de los efectos causados por dichos eventos ha adquirido importancia en las últimas décadas. En este trabajo, se estudia la explosión BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) y se propone como objetivo la obtención de una correlación que estime distancias de seguridad en función de la energía interna total del sistema bajo estudio y el nivel de daño causado de acuerdo al tipo de receptor. Se formula una combinación lineal de funciones convexas con coeficientes a determinar mediante la implementación en GAMS, comparando las distancias de seguridad estimadas por dicha expresión con las arrojadas por un modelo matemático basado en los principios fundamentales. Dicha correlación podría ser empleada en la optimización de diseño inherentemente seguro de layout en trabajos futuros.

Palabras Claves: Funciones convexas; modelo matemático; distancia de seguridad; BLEVE.

1. Introducción

En la industria de procesos químicos, uno de los problemas más importantes es la evaluación de las consecuencias debidas a eventos accidentales (incendio, explosión, difusión de sustancias tóxicas). La búsqueda de una metodología que contribuya con la prevención y minimización de dichas consecuencias, se ha extendido globalmente luego de varios accidentes que han marcado la historia del desarrollo industrial como los que acontecieron en Flixborough - Inglaterra (1974), Seveso - Italia (1976) y Bhopal - India (1984) (AIChE, 2000).

El tipo de explosión BLEVE está catalogado como uno de los eventos más catastróficos dada la magnitud de la energía mecánica liberada (Sellami et al., 2018). La misma provoca la ruptura violenta del recipiente que contiene a la sustancia, proyectando sus fragmentos y generando una onda expansiva (Hemmatian et al., 2017). Ésta última causa graves efectos sobre estructuras y equipos aledaños, daños a la salud de las personas incluso la muerte, en función a la distancia a la que se encuentren dichos receptores.

Frente a este escenario y en vistas de abordar en futuros trabajos el modelado y optimización del diseño inherentemente seguro de layout, aquí se presenta una metodología para la estimación de distancias de seguridad. Ésta queda definida por la Asociación Europea de Gases Industriales

como la separación entre el suceso y el receptor que mitigaría los efectos del accidente reduciendo al mínimo el daño causado. Específicamente, se propone una combinación de funciones convexas que relacionen el nivel de daño/tipo de receptor, energía interna total del sistema al momento de la explosión y la distancia. En este punto es importante resaltar que el concepto de convexidad es fundamental en el análisis y resolución de los problemas de optimización. La bondad de la correlación obtenida se evalúa comparando los resultados arrojados por la misma frente a los brindados por un modelo basado en los principios fundamentales.

2. Metodología

Se implementa en GAMS (General Algebraic Modeling System) un modelo general que consta de las siguientes etapas:

- a) Propuesta de una correlación convexa que relacione la distancia de seguridad (diapr), la energía interna total (U) y el nivel de daño cuantificado en sobrepresión (ΔP), a partir de una combinación lineal de distintos tipos de funciones convexas simples (x , x^2 , e^x , $\frac{1}{x^2}$), según se indica en la ecuación (1).

$$\text{diapr (m)} = c_1 U + c_2 \Delta P + c_3 U \Delta P + c_4 U^2 + c_5 \Delta P^2 + c_6 e^U + c_7 e^{\Delta P} + \frac{c_8}{U^2} + \frac{c_9}{\Delta P^2} \quad (1)$$

- b) Implementación de un modelo riguroso de cálculo basado en los principios fundamentales.

El estudio de la BLEVE como fenómeno físico, implica establecer el tipo de expansión que sufre el vapor al momento de la explosión. Se decide adoptar expansión adiabática irreversible propuesta en el modelo de Planas-Cuchi et al. (2004), dadas sus muy buenas valoraciones en trabajos anteriores (Hemmatian et al., 2017; Kraft, 2018).

Se parte del cálculo del volumen total de vapor que contribuye a la energía de expansión. Para esto se estima la fracción de vaporación instantánea (f) del líquido presente (V_L) y el volumen de vapor generado (V_{ei}). Este último se adiciona a la fase vapor (V_V) previamente existente; obteniéndose de esta manera el volumen total de vapor (V_T).

$$f = 1 - \exp \left[-2.63 \frac{C_{pL,Tb}}{\lambda_{Tb}} (T_c - T_b) \left(1 - \left(\frac{T_c - T}{T_c - T_b} \right)^{0.38} \right) \right] \quad (2)$$

$$V_{ei} = V_L \times f \times \left(\frac{\rho_L}{\rho_V} \right) \quad (3)$$

$$V_T = V_V + V_{ei} \quad (4)$$

siendo $C_{pL,Tb}$ y λ_{Tb} , el calor específico en estado líquido y el calor latente de vaporización a la temperatura normal de ebullición respectivamente. T_c , T_b y T , la temperatura crítica, la temperatura normal de ebullición y la temperatura a la cual ocurre la BLEVE. Ésta última queda determinada al definir la presión de ruptura del recipiente, dada la hipótesis de equilibrio al momento de la explosión.

Se estima la energía mecánica total liberada de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$E_{MT} = [(u_L - u_V)m_T x - m_T u_L + U] \quad (5)$$

donde u_V y u_L representan la energía interna específica del vapor y del líquido, respectivamente, a las condiciones de presión y temperatura finales.

Según se indica en la ecuación (6), x representa la fracción de vapor respecto a la masa total de la sustancia en estudio al final de la expansión adiabática no ideal.

$$x = \frac{m_T P u_L - V_T P + m_T u_L - U}{[(u_L - u_V) - (u_V - u_L)P]m_T} \quad (6)$$

Por otro lado, la energía interna inicial total (U) se estima a partir de la ecuación (7), donde u_{V0} y u_{L0} , representan la energía interna específica del vapor y del líquido justo antes de que ocurra la explosión, m_T , m_V y m_L , la masa total, la masa de líquido y la masa de vapor en el recipiente, respectivamente. Una fracción de esta energía se transforma en onda expansiva. Asumiendo un rendimiento de explosión (α) del 40%, característico de una BLEVE, se tiene la energía transferida a la onda expansiva (E_{SP}), como se indica en la ecuación (8).

$$U = m_V \times u_{V0} + m_L \times u_{L0} \quad (7)$$

$$E_{SP} = \alpha E_{MT} \quad (8)$$

Finalmente, la estimación de las distancias de seguridad se efectúa mediante una regresión obtenida de la curva bridada por el método TNT (CCPS, 1994).

$$ds = 0,001746 \times \Delta P^{-0,665} \times \sqrt[3]{\frac{E_{SP}}{E_{mTNT}}} \quad (9)$$

c) Incorporación de restricciones adicionales.

En el diseño de layout es conveniente situarse en el peor escenario, de esta forma, la distancia ($diapr$) debe sobreestimar a la determinada con el modelo riguroso (ds).

$$diapr \geq ds \quad (10)$$

Como la sobrepresión es inversamente proporcional a la distancia, para cada sustancia (k) y un nivel de sobrepresión ($i+1$) superior al anterior (i) se debe garantizar la disminución de la distancia, siendo i los niveles de sobrepresión considerados y k la sustancia.

$$dapr(k, i) \geq dapr(k, i + 1) \quad i = 1 - 6, k = 1 - 6 \quad (11)$$

d) Determinación de los coeficientes de la correlación propuesta (c_1 a c_9), maximizando el coeficiente de determinación (R^2). Para ello, se toman como referencia los valores obtenidos a partir del modelo riguroso. Luego, analizando el valor de los coeficientes resultantes se define cuales

conforman la funcionalidad para estimar la distancia total y cuales se descartan debido a su mínima influencia.

A continuación, se detallan los parámetros y las condiciones adoptadas para fijar los grados de libertad del modelo:

- Nivel de daño/tipo de receptor relacionado por la sobrepresión incidente. Se determina para cada receptor de interés empleando el método PROBIT (NTP N° 291). De esta manera, se definen las siguientes relaciones entre el nivel de daño y la sobrepresión incidente (Tabla I):

Tabla I. Consecuencias a exposiciones de onda expansiva

Sobrepresión (kPa)	Consecuencia:
3.466	Daños estructurales leves (ruptura de cristales)
5	Rotura de tímpano
12.5	Daños estructurales importantes (demoliciones parciales)
35	Muerte por hemorragia pulmonar
55.15	Destrucción de conexiones de tuberías y tanques aledaños
70.105	Destrucción de maquinaria pesada

- Selección de las sustancias de referencia. En este aspecto, es necesario asegurar que la distancia estimada represente la naturaleza del evento para distintos tipos de sustancias que habitualmente provocan BLEVES. Para esto se emplearon las estadísticas de cantidad de accidentes tipo BLEVE producidos y las sustancias relacionadas, brindadas por la base de datos MHIDAS. Se seleccionaron seis sustancias: propileno, amoniaco, butano, cloro, isobutano y clorometano, que explican gran porcentaje de los eventos.
- Propiedades termodinámicas de las sustancias (Perry y Green, 2001).
- Se define un rango de análisis de la energía interna en función de las sustancias consideradas y la presión de ruptura adoptada (2000 kPa).

Por otra parte, en base a la misma metodología, se puede también plantear la evaluación de los posibles daños que puedan causar las sustancias peligrosas del inventario de una planta ya instalada en la que no se tuvieron en cuenta aspectos de diseño inherentemente seguro en la etapa de diseño preliminar. Para ello se propone una nueva correlación (12) en la que la energía interna y la distancia se definen como variables independientes y el nivel de sobrepresión ($Spapr$) como variable dependiente. La Tabla II lista distancias comunes de instalaciones industriales.

$$Spapr = c_1U + c_2D + c_3UD + c_4U^2 + c_5D^2 + c_6e^U + c_7e^D + \frac{c_8}{U^2} + \frac{c_9}{D^2} \quad (12)$$

Tabla II. Distancias comunes de instalaciones industriales

Distancia de instalación (m)	Entre:
5-15	Tanques ubicados en el parque de almacenamiento
20-50	Parque de almacenamiento y unidad de procesamiento
150-250	Instalaciones y zona urbana

3. Resultados

A continuación, se presenta la correlación obtenida para la determinación de distancias de seguridad (Ecuación 13). El método no lineal de optimización empleado (CONOPT) arroja un coeficiente de determinación (R^2) igual a 0.983. Las unidades de medida para cada variable son: m, kPa y GJ para distancia, sobrepresión y energía interna total, respectivamente.

$$diapr = 0.174 U - 2.52\Delta P - 0.00237U\Delta P + 0.0195\Delta P^2 + 97.446e^{0.001\Delta P} + \frac{175}{U^2} + \frac{792.33}{\Delta P^2} \quad (13)$$

Luego, adoptando distintos niveles de sobrepresión se obtienen curvas paramétricas de la distancia en función de la energía interna total del sistema al momento de la explosión, como se muestra en la Figura 1. Las consecuencias asociadas a los tres niveles de sobrepresión aquí adoptados (3.466, 12.5 y 70.105 kPa) corresponden a daños estructurales leves, importantes y destrucción de maquinaria pesada, respectivamente.

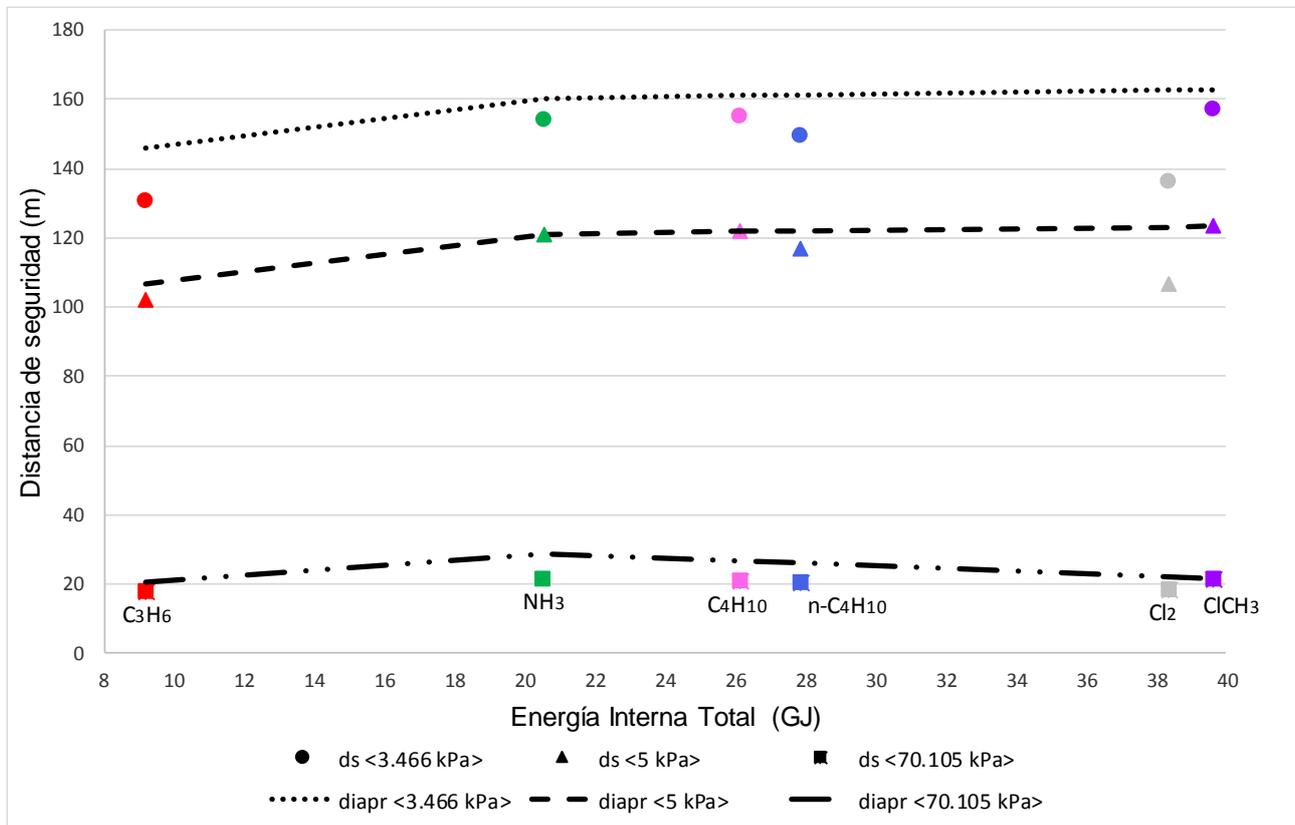


Figura 1. Distancia de seguridad en función de la energía interna total para tres niveles de sobrepresión.

Por otra parte, a continuación, se presenta la correlación que permite estimar el nivel de sobrepresión para valores de energía interna y distancia de afectación entre equipos dados. El coeficiente de determinación (R^2) es igual a 0,976. Expresadas las variables en las mismas unidades que la correlación anterior se tiene:

$$Spapr = 0.44U - 0.0529D + 0.116D^2 + 11.349e^{0.001D} + \frac{443.201}{U^2} + \frac{2.6 \times 10^4}{D^2} \quad (14)$$

4. Discusión

En la Figura 1 se puede observar que la distancia de seguridad estimada (líneas) se ajusta muy bien para los distintos niveles de sobrepresión. Con el objeto de contar con medidas conservadoras y de acuerdo a las restricciones impuestas, los valores de distancia obtenidos a partir de la correlación sobreestiman levemente, en la mayoría de los casos, los resultados obtenidos según el modelo riguroso para diferentes sustancias (puntos). Se debe notar además que la mayor diferencia se encuentra para el cloro y el butano. Las mismas podrían ser ocasionadas por la diferencia en las propiedades físicas de dichas sustancias con respecto a las demás (temperatura de ebullición, temperatura crítica) que tienen gran incidencia en el cálculo del volumen total de vapor que contribuye a la energía de expansión. Aun así, la sobreestimación en el peor caso del cloro (sobrepresión de 3.466 kPa) no supera el 18 %. También es importante considerar que, al momento de fijar el volumen del sistema, la masa de las sustancias difiere en un amplio rango dadas las propiedades físicas de éstas, siendo la masa una variable fundamental tanto en la estimación de la distancia de seguridad como en el análisis de riesgo y optimización en el diseño de layout. Es por eso que para tener en cuenta dicha variación, se seleccionó como variable independiente la energía interna total del sistema al momento de la explosión, pudiéndose así abarcar un amplio rango como se observa en los valores mostrados en el eje de las abscisas. De esta manera, la correlación obtenida se podría aplicar a muy variados casos contemplando volúmenes de inventario amplios.

Verificación de las correlaciones.

Dada, por ejemplo, la ocurrencia de una explosión BLEVE en un tanque de almacenamiento de metano de 700 m³, para una presión de ruptura de 2381 kPa y tomando como nivel de daño la destrucción de conexiones de tuberías y tanques aledaños ($\Delta P = 55.15$ kPa), la distancia de seguridad estimada (diapr) es de 40.8 m, 7.1% superior a la obtenida según el modelo riguroso. A una presión de ruptura de 3286 kPa y considerando la destrucción de maquinaria pesada ($\Delta P = 70.105$ kPa), la distancia es de 36.1 m (sobreestimada en 1.4 m) mientras que a 594 kPa y para daños estructurales importantes diapr=105.9 m siendo 95.2 m la distancia obtenida según el modelo riguroso.

Se observa entonces que se cumple satisfactoriamente con las dos restricciones (sobreestimación y proporcionalidad inversa entre distancia y sobrepresión) a pesar de que la sustancia seleccionada no estaba incluida dentro de las sustancias seleccionadas para estimar los coeficientes de la correlación y considerarse, además, otras condiciones de operación. Se puede inferir entonces que dicha correlación cumple con el objetivo principal del trabajo.

Por último, la correlación que estima sobrepresiones en función de la distancia entre equipos y la energía interna liberada en el momento de la explosión (Ecuación 14) se evalúa aquí para el caso de un reservorio intermedio de propano (300 m³) obteniéndose para distancias de 15, 50 y 150 m sobrepresiones de 72.23, 16.05, 7.20 kPa, que comparados con los valores obtenidos por el modelo riguroso (71.91, 15.97 y 6.50 kPa, respectivamente), muestran un error muy bajo.

5. Conclusiones

Efectuando un análisis de los resultados, se concluye que, dada una explosión BLEVE, las correlaciones obtenidas permiten capturar las relaciones entre las variables críticas de interés aceptablemente. Se han evaluado las expresiones con sustancias que no han sido consideradas

en la aproximación realizada en el modelo matemático, evidenciando un comportamiento adecuado. Además, queda expuesto que las expresiones obtenidas podrían ser empleadas tanto en problemas de diseño óptimo de layout como en análisis de riesgo de instalaciones existentes, teniendo como ventajas su amplio rango de aplicación como así también su convexidad.

Reconocimientos

Se agradece el apoyo financiero provisto por la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Rosario (UTN-FRRo) y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

Bibliografía

- AIChE CCPS (Center for Chemical Process Safety). (2000). Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis. Segunda edición. Nueva York.
- CCPS. (1994). Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapour Cloud, Explosions, Flash Fires and BLEVEs. CCPS-AIChE, New York.
- Hemmatian, B., Casal, J., Planas, E.(2017). A new procedure to estimate BLEVE overpressure. Process Saf. Environ. Prot. 111, 320–325. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.07.016>
- Kraft, R. (2018). Evaluación de explosión BLEVE en tanques de almacenamiento. Obtención de distancias mínimas de impacto. Jorn. Jóvenes Investig. Tecnológicos 2018 10.
- Nota Técnica de Prevención N°293-INSHT: Modelos de vulnerabilidad de las personas por accidentes mayores: método Probit.
- Planas-Cuchi, E., Salla, J.M., Casal, J.(2004). Calculating overpressure from BLEVE explosions. Loss Prev. Process Ind. 17, 6.
- Perry, R., Green, D. (2001). Manual del Ingeniero Químico. Séptima edición. Tomo I.
- Sellami, I., Nait-Said, R., Chetehouna, K., de Izarra, C., Zidani, F. (2018). Quantitative consequence analysis using Sedov-Taylor blast wave model. Part II: Case study in an Algerian gas industry. Process Saf. Environ. Prot. 116, 9.