



Obtención de Correlaciones Convexas para el Análisis de los Efectos Causados por Explosiones tipo BLEVE. Estimación de Distancias de Seguridad en Función de Niveles de Vulnerabilidad Especificados.

Obtaining convex correlations for the analysis of the BLEVE blast effects. Safety distances estimation based on specific vulnerability levels.

Presentación: 03/01/2020

Aprobación: 21/10/2020

Romina Alejandra Kraft

Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería, Facultad Regional Rosario, Universidad Tecnológica Nacional (UTN) – Argentina.
romina.kraft@hotmail.com

Patricia Liliana Mores

Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería, Facultad Regional Rosario, Universidad Tecnológica Nacional (UTN) – Argentina.
patricia.mores@gmail.com

Nicolás José Scenna

Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería, Facultad Regional Rosario, Universidad Tecnológica Nacional (UTN) – Argentina.
nscenna@yahoo.com.ar

Resumen

En los últimos años, debido al gran número de accidentes catastróficos en el sector industrial, la obtención de una metodología cuya aplicación contribuya a la mitigación de los daños causados ha adquirido gran importancia. En este trabajo, se obtienen dos correlaciones que describen el comportamiento de un evento específico (explosión tipo BLEVE) por medio de una combinación lineal de funciones convexas simples entre las principales variables:

energía interna total del sistema al momento de la explosión, distancia y nivel de daño/tipo de receptor. La primera permite estimar la distancia de seguridad frente a una explosión de cualquier sustancia peligrosa y la segunda, el nivel de daño (expresado en términos de sobrepresión) ocasionado a un receptor ubicado a una cierta distancia del evento catastrófico. En trabajos futuros, se pretende emplear las mismas en la optimización de diseño inherentemente seguro de layout.

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

Abstract

In the last years, due to the great number of catastrophic accidents in the chemical industry, obtaining a methodology whose application contributes to the mitigation of its effects has become important. In this work, two correlations that describe the behavior of a specific event (BLEVE explosion) are obtained by means of a linear combination of simple convex functions among the main variables: total internal energy of the system just before the explosion, distance and level of damage / type of receptor. The first correlation allows to estimate the safety distance of any hazardous substance producing a BLEVE and the second, the level of damage (expressed in terms of overpressure) caused to a typical receptor located at a given distance from the catastrophic event. In future works, these correlations could be applied following inherently safe process design methodologies.

Keywords: Convex functions; mathematical model; safety distance; 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, por ejemplo, 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., 2017a). 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 como así también el cálculo de la sobrepresión generada por la onda expansiva a una cierta distancia del evento. Específicamente, se proponen dos correlaciones que consisten en la combinación lineal de funciones convexas que vinculan las variables: nivel de daño/tipo de receptor, energía interna total del sistema al momento de la explosión y distancia, cumpliendo diferentes roles de dependencia de acuerdo a la formulación planteada. Es importante destacar que el concepto de convexidad

es fundamental en la resolución de los problemas de optimización. La bondad de las correlaciones obtenidas se evalúa comparando los resultados arrojados por las mismas frente a los brindados por un modelo basado en los principios fundamentales.

2. Metodología

A continuación, se describe la metodología seguida para la obtención de una correlación que permite estimar distancias de seguridad frente a un evento tipo BLEVE en función del nivel de daño y la energía interna:

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

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

- 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. En este trabajo, se considera una expansión adiabática irreversible de acuerdo al modelo propuesto por Planas-Cuchi et al. (2004), dadas sus muy buenas valoraciones en la literatura especializada (Abbasi y Abbasi, 2007; Bubbico y Marchini, 2008; Hemmatian et al., 2017a, 2017b; Kraft, 2018; Laboureur et al., 2014; Ogle et al., 2012).

A continuación, se describen las principales ecuaciones del modelo (para más detalle ver Planas-Cuchi et al., 2004).

En este modelo se asume que tanto el líquido, por vaporización instantánea, como el vapor previamente existente, por expansión, contribuyen a la energía mecánica liberada. Es por eso que se debe obtener la masa de líquido m_L^β (kg) y de vapor m_V^β (kg) en las condiciones justo antes de que ocurra la explosión (β).

Para esto, se parte de la obtención de la masa de líquido m_L^α (kg) y de vapor m_V^α (kg) en las condiciones normales de almacenamiento (α), siendo V_{TK} (m^3) el volumen de tanque, $F_L(-)$, el nivel del líquido, $V_L^\alpha \left(\frac{m^3}{kg}\right)$ y $V_V^\alpha \left(\frac{m^3}{kg}\right)$ el volumen específico de líquido y de vapor en estas condiciones, respectivamente.

$$m_L^\alpha = \frac{F_L \cdot V_{TK}}{V_L^\alpha} \quad (2)$$

$$m_V^\alpha = \frac{(1 - F_L) \cdot V_{TK}}{V_V^\alpha} \quad (3)$$

$$m_T = m_L^\alpha + m_V^\alpha \quad (4)$$

Asumiendo una evolución a volumen constante desde la condición normal de almacenamiento a la condición justo antes de la explosión, negando la existencia de un escape de materia previo a la explosión, se obtiene la masa de líquido y de vapor contenida en el recipiente justo antes de que ocurra el siniestro, de acuerdo a:

$$V_{TK} = V_L^\beta + V_V^\beta \quad (5)$$

$$V_L^\beta = v_L^\beta \cdot m_L^\beta \quad (6)$$

$$V_V^\beta = v_V^\beta \cdot m_V^\beta \quad (7)$$

$$m_T = m_L^\beta + m_V^\beta \quad (8)$$

representando V_L^β (m^3) y V_V^β (m^3), el volumen de líquido y de vapor contenido en el recipiente justo antes de la explosión y $v_L^\beta \left(\frac{m^3}{kg} \right)$, $v_V^\beta \left(\frac{m^3}{kg} \right)$, el volumen específico de líquido y de vapor respectivamente, en las condiciones inmediatamente previas a la explosión.

La energía mecánica total liberada E_{MT} (kJ) depende de la energía interna específica del líquido y del vapor $u_L^\gamma \left(\frac{kJ}{kg} \right)$ y $u_V^\gamma \left(\frac{kJ}{kg} \right)$, respectivamente, la fracción de vapor al final de la expansión adiabática no ideal (x) respecto a la masa total m_T (kg) de la sustancia en estudio y el volumen específico del líquido y del vapor ($v_L^\gamma \left(\frac{m^3}{kg} \right)$ y $v_V^\gamma \left(\frac{m^3}{kg} \right)$) definidas todas las propiedades anteriores en las condiciones de presión y temperatura finales (equilibrio a la presión atmosférica γ) y la energía interna total al momento de la explosión U (kJ), según se indica en las Ec. 9 y 10.

$$E_{MT} = \left[(u_L^\gamma - u_V^\gamma) \cdot m_t \cdot x - m_T \cdot u_L^\gamma + U \right] \quad (9)$$

$$x = \frac{m_T \cdot P \cdot v_L^\gamma - V_{TK} \cdot P + m_T \cdot u_L^\gamma - U}{\left[(u_L^\gamma - u_V^\gamma) - (v_V^\gamma - v_L^\gamma) \cdot P \right] \cdot m_T} \quad (10)$$

definiendo a P (kPa) como la presión atmosférica.

La energía interna total se estima a partir de la ecuación (11), donde $u_L^\beta \left(\frac{kJ}{kg} \right)$ y $u_V^\beta \left(\frac{kJ}{kg} \right)$, representan la energía interna específica del líquido y del vapor justo antes de que ocurra la explosión. Una fracción de esta energía se transforma en onda expansiva. Asumiendo un rendimiento de explosión (η) del 40%, característico de una BLEVE, se tiene la energía transferida a la onda expansiva E_{sp} (kJ), como se indica en la ecuación (12).

$$U^\beta = m_V^\beta \times u_V^\beta + m_L^\beta \times u_L^\beta \quad (11)$$

$$E_{SP} = \eta \cdot E_{MT} \quad (12)$$

Finalmente, la expresión para el cálculo de distancias de seguridad (Ec. 13) se obtiene por regresión de los datos brindados al aplicar el método TNT (CCPS, 1994).

$$ds(m) = 0,001746 \times \Delta P(\text{kPa})^{-0,665} \cdot \sqrt[3]{\frac{E_{SP}}{E_{mTNT}}} \quad (13)$$

siendo E_{mTNT} el calor de combustión del TNT cuyo valor es 4.68×10^3 kJ/kg.

c) Incorporación de restricciones adicionales.

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

$$R1 \quad diapr \geq ds \quad (14)$$

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.

$$R2 \quad dapr(k,i) \geq dapr(k,i+1) \quad i=1-6, k=1-6 \quad (15)$$

Determinación de los coeficientes de la correlación (c_1 a c_9)

Se realiza maximizando el coeficiente de determinación (R^2). Como se observa en la ecuación 16, se toman como referencia los valores obtenidos a partir del modelo riguroso, definiendo *ds* y *diapr* como la media aritmética de las distancias de seguridad estimadas por el modelo basado en los principios fundamentales y por la correlación obtenida, respectivamente. El modelo matemático se resuelve iterativamente con el objeto de determinar la influencia de los términos en la correlación, descartando los que, debido al coeficiente calculado, aportan despreciablemente.

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{k=1}^6 \sum_{i=1}^6 (ds(k,i) - \overline{ds}) \times (diapr(k,i) - \overline{diapr}) \right]^2}{\left[\sum_{k=1}^6 \sum_{i=1}^6 (ds(k,i) - \overline{ds})^2 \right] \times \left[\sum_{k=1}^6 \sum_{i=1}^6 (diapr(k,i) - \overline{diapr})^2 \right]} \quad (16)$$

Las ecuaciones (1) a (16) se implementan en GAMS (General Algebraic Modeling System), considerando los siguientes parámetros y condiciones adoptadas para fijar los grados de libertad del modelo:

- Se adopta un volumen de almacenamiento (V_{TK}) de 100 m³ con un nivel de líquido del 80% y una presión de ruptura de tanque de 2000 kPa (tomada como un valor conservativo de diseño).
- 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 BLEVE. 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, amoníaco, butano, cloro, isobutano y clorometano, que explican gran porcentaje de los eventos. Las propiedades termodinámicas se toman de (Perry y Green, 2001).
- 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 1):

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

Tabla 1: Consecuencias a exposiciones de onda expansiva

Por otra parte, en base a la misma metodología, se plantea la evaluación de los posibles daños que puedan causar las sustancias peligrosas del inventario de una planta ya instalada. Para ello se propone la segunda correlación (17) 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 2 lista distancias comunes entre unidades en instalaciones industriales.

$$Spapr = c_1 U + c_2 D + c_3 UD + c_4 U^2 + c_5 D^2 + c_6 e^U + c_7 e^D + \frac{c_8}{U^2} + \frac{c_9}{D^2} \quad (17)$$

Distancia de instalación (m)	Entre:
5-15	Tanques ubicados en el parque de almacenamiento
50-100	Parque de almacenamiento y unidad de procesamiento
150-250	Instalaciones y zona urbana

Tabla 2: Distancias comunes de instalaciones industriales

Finalmente, las correlaciones propuestas se consideran como un modelo “reducido” que aproxima al modelo riguroso previamente presentado.

3. Resultados y discusión

3.1 Correlación para la estimación de distancias de seguridad

A continuación, se presenta la correlación obtenida para la determinación de distancias de seguridad (Ecuación 18). 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.

$$diapr = 0.174U - 2.52\Delta P - 0.00237U\Delta P + 0.0195\Delta P^2 + 97.446e^{0.001\Delta P} + \frac{175}{U^2} + \frac{792.33}{\Delta P^2} \quad (18)$$

En la Figura 1 se representan los valores de distancia de seguridad en función de la energía interna total del sistema al momento de la explosión y la sobrepresión generada (nivel de daño/ tipo de receptor). Específicamente, se comparan los resultados obtenidos empleando la correlación (superficie amarilla) y el modelo riguroso. En este último caso, cada punto corresponde a la distancia de seguridad para una sustancia particular considerando un nivel de daño dado, cuantificado en sobrepresión. Se observa que la correlación propuesta, basada en una combinación lineal de funciones convexas, se ajusta satisfactoriamente a los resultados arrojados por el modelo riguroso, garantizando, ante discrepancia entre ambos modelos, una leve sobreestimación, cumpliendo con la restricción **R1** (ecuación 14) en todo el rango de aplicación.

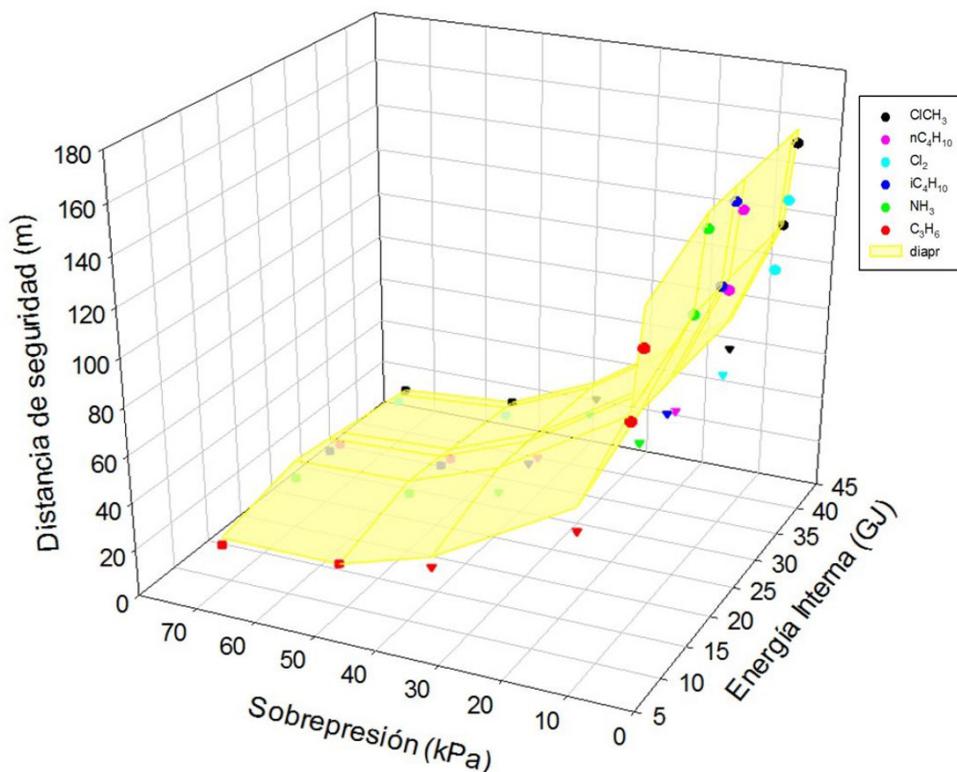


Figura 1: Distancia de seguridad en función de la energía interna total del sistema al momento de la explosión y la sobrepresión generada.

Se observa que la ecuación 18 permite estimar distancias de seguridad para toda sustancia que pueda ocasionar BLEVEs de acuerdo a las condiciones en las que se encuentre, contemplando distintos niveles de sobrepresión, ya que en una única variable (la energía interna total) están relacionadas tanto las condiciones al momento de la explosión como la cantidad y naturaleza de la sustancia, siendo ventajoso dado que se evitan los numerosos cálculos, indispensables en el modelo riguroso. Es decir, que en esta única ecuación (18) se incluye no sólo uno de los métodos gráficos más usados en el análisis de riesgo (método TNT) sino que también se facilita el análisis del sistema en estudio de acuerdo a la sustancia almacenada junto con las características del reservorio que la contiene (presión de ruptura y volumen).

Al momento de fijar el volumen del sistema, la masa contenida es diferente para cada sustancia variando en gran medida dadas sus propiedades físicas, siendo la masa una variable fundamental tanto en la estimación de la distancia de seguridad como en el análisis de riesgos y optimización en el diseño de layout. La estrategia adoptada resulta en un amplio rango de variación de energía interna total, contemplando un número suficiente de tipos de sustancia para cubrir un gran intervalo, logrando que la correlación obtenida sea aplicable a muy variados casos/ sustancias contemplando el rango de aplicación industrial.

Caso de aplicación: Tanque de almacenamiento de CH₄

En la Figura 2 se muestran las estimaciones de distancia de seguridad para los distintos niveles de daño de acuerdo al tipo de receptor, aplicando el modelo riguroso y la correlación (ecuación 18) considerando un tanque de almacenamiento de metano de 600 m³ con una presión de ruptura de 3681 kPa. Si bien la sustancia *no ha sido utilizada* en los datos de entrada del modelo global para obtener la correlación, se observa un muy buen ajuste reflejando a su vez la proporcionalidad inversa entre la distancia y la sobrepresión.

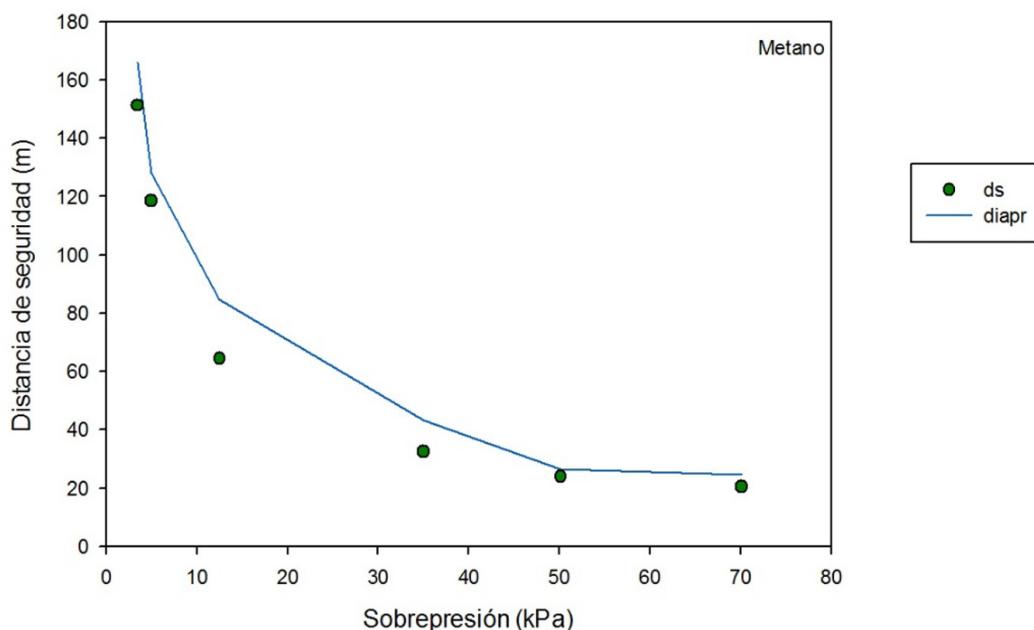


Figura 2: Distancia de seguridad en función de la sobrepresión generada por la explosión de un tanque de almacenamiento de metano.

3.2 Correlación para la estimación del nivel de daño:

Específicamente esta correlación se emplea para la estimación del nivel de daño cuantificado por la sobrepresión de acuerdo a la separación entre el lugar donde podría ocurrir un evento tipo BLEVE y el receptor de interés (distancia de separación, D). A diferencia del caso anterior en el que el foco está en el evento, esta correlación está centrada fundamentalmente en el receptor ya que, a partir del nivel de sobrepresión estimado es posible aplicar el método PROBIT y determinar la probabilidad de afectación del mismo (fisura, ruptura total, etc.).

La ecuación 19 permite estimar el nivel de sobrepresión (Sp_{apr}) dada la energía interna y la distancia de separación. El coeficiente de determinación (R^2) es igual a 0,977. Expresadas las variables en las mismas unidades que la correlación anterior se tiene:

$$Sp_{apr} = -3.465U + 3.346D - 9.57 \times 10^{-4}DU + 2.167 \times 10^{-3}D^2 + 3454.52e^{0.001U} + 11.349e^{0.001D} + \frac{400.669}{U^2} + \frac{2.6 \times 10^4}{D^2} \quad (19)$$

Caso de aplicación: Tanque de almacenamiento de C_3H_8

Se determina el campo de onda expansiva (sobrepresión) generada por la explosión de un reservorio intermedio de propano de 300 m^3 considerando diversas presiones de ruptura (1275, 1603, 1988, 2436 y 2956 kPa) para receptores ubicados a 100 y 150 m del tanque (Fig. 3). Para estas condiciones, el rango de energía interna varía aproximadamente entre 71 y 85 GJ. En este intervalo, se observa un incremento prácticamente lineal de la sobrepresión con el aumento de la energía interna, tanto para la correlación como para el modelo riguroso. Por otro lado, como es de esperar, cuanto mayor es la distancia entre el suceso y el receptor menor será el nivel de daño.

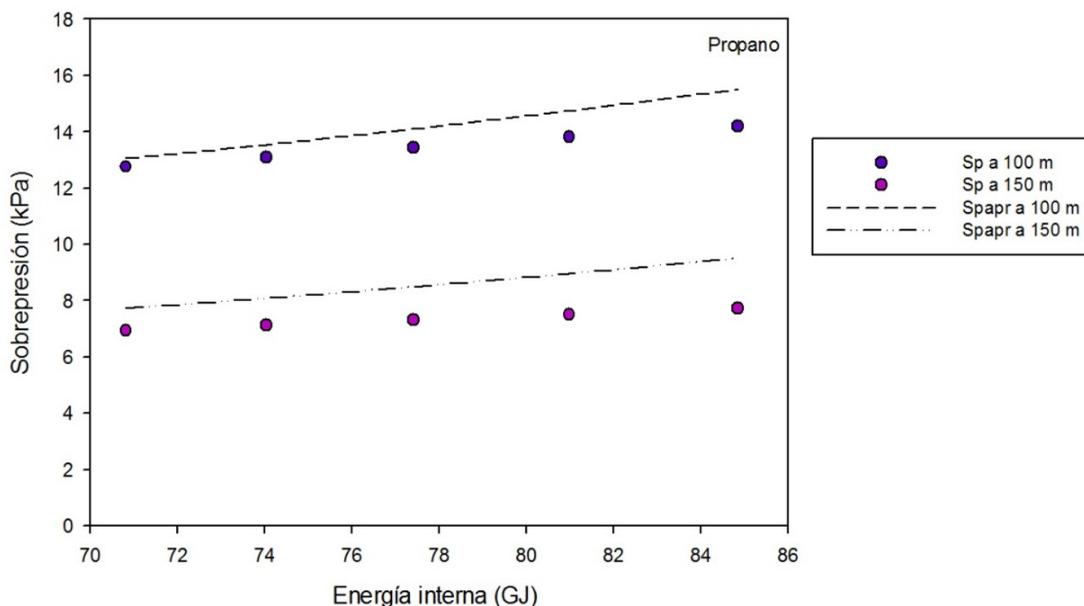


Figura 3: Sobrepresión generada por la explosión de un tanque de almacenamiento de propano.

4. Conclusiones

Efectuando un análisis de los resultados, se concluye que, dada una explosión BLEVE, las correlaciones obtenidas permiten capturar aceptablemente las relaciones entre las variables críticas de interés. 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, es evidente que las expresiones obtenidas pueden 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 simplicidad.

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).

Referencias

- Abbasi, T., Abbasi, S.A. (2007). "Accidental risk of superheated liquids and a framework for predicting the superheat limit". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 20, 165–181.
- AIChE CCPS (Center for Chemical Process Safety). (2000). *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*. Segunda edición. Nueva York.
- Bubbico, R., Marchini, M. (2008). "Assessment of an explosive LPG release accident: A case study". *Journal of Hazardous Materials*. 155, 558–565.
- CCPS (Center for Chemical Process Safety). (1994). *Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapour Cloud, Explosions, Flash Fires and BLEVEs*. CCPS-AIChE, Nueva York.
- Hemmatian, B., Casal, J., Planas, E. (2017a). "A new procedure to estimate BLEVE overpressure". *Process Safety and Environmental Protection*. 111, 320–325.
- Hemmatian, B., Planas, E., Casal, J. (2017b). "Comparative analysis of BLEVE mechanical energy and overpressure modelling". *Process Safety and Environmental Protection* 106, 138–149.
- Kraft, R. (2018). "Evaluación de explosión BLEVE en tanques de almacenamiento. Obtención de distancias mínimas de impacto". *Jorn. Jóvenes Investig. Tecnológicos*. Venado Tuerto, Argentina, 25 y 26 de octubre 2018.
- Laboureur, D., Heymes, F., Lapebie, E., Buchlin, J.M., Rambaud, P. (2014). "BLEVE overpressure: Multiscale comparison of blast wave modeling". *Process Safety Progress*. 33, 274–284.
- Nota Técnica de Prevención N°291-INSHT: Modelos de vulnerabilidad de las personas por accidentes mayores: método Probit.
- Ogle, R.A., Ramirez, J.C., Smyth, S.A. (2012). "Calculating the explosion energy of a boiling liquid expanding vapor explosion using exergy analysis". *Process Safety Progress* 31, 51–54.
- Planas-Cuchi, E., Salla, J.M., Casal, J. (2004). "Calculating overpressure from BLEVE explosions". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 17, 431-436.
- Perry, R., Green, D. (2001). *Manual del Ingeniero Químico*. Séptima edición. Tomo I. McGraw-Hill, Nueva York.
- 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 Safety and Environmental Protection* 116, 771-779.