

Influencia de la reducción del factor de visión en las consecuencias ocasionadas por una bola de fuego.

Influence of the configuration factor reduction in the consequences caused by a fireball.

Presentación: 4 y 5 de octubre 2022

Doctoranda:

Romina Alejandra Kraft

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

romina.kraft@hotmail.com

Director:

Nicolás José Scenna

Codirectora:

Patricia Liliana Mores

Resumen

El conocimiento de las consecuencias ocasionadas por los accidentes industriales de las últimas décadas hace imperante la propuesta de nuevas metodologías para minimizar los daños. Uno de los eventos más peligrosos son las explosiones BLEVE (Boiling Liquid Expanded Vapour Explosion) y la inmediata formación de una bola de fuego, dado que el campo de radiación térmica generada es de gran alcance. El cálculo de distancias seguras puede estar combinado con la presencia de sistemas de protección pasiva de forma tal que se reduzcan las consecuencias al mínimo costo de instalación/operación. En este trabajo, se propone una correlación simple que evalúa la influencia de la disminución del factor visión debido a la presencia de una obstrucción (por ejemplo: paredes contra-incendios) en la estimación de distancias seguras o definida una distancia, la disminución del impacto (radiación térmica incidente) dada la ocurrencia de una bola de fuego. Se concluye que la distancia disminuye significativamente con la reducción del factor de visión y que tal correlación puede implementarse incluso en las primeras etapas del diseño para evaluar la factibilidad de colocación de sistemas de protección pasivas.

Palabras clave: Reducción del factor de visión, Bola de fuego, Modelo simple, Sistemas de protección.

Abstract

Knowledge of the consequences caused by industrial accidents in recent decades makes it imperative to propose new methodologies to minimize the damage. One of the most hazardous events are BLEVEs (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) and the immediate fireball generation, since the thermal radiation field generated is far-reaching. The calculation of safety distances can be combined with the presence of passive protection systems in such a way as to reduce the consequences at the minimum installation/operation cost. In this paper, a simple correlation is proposed that evaluates the influence of the reduction of the configuration factor due to the presence of an obstruction (for example: firewall) in the estimation of safety distances or defined a distance, the reduction of the impact (incident thermal radiation) given the occurrence of a fireball. It is concluded that

the distance decreases significantly with the reduction of the configuration factor and that such a correlation can be implemented even in the early stages of the design to evaluate the feasibility of placing passive protection systems.

Keywords: Reduction of configuration factor, Fireball, Simple model, Protection system.

Introducción

Uno de los accidentes tecnológicos con múltiples consecuencias severas es la falla de recipientes a presión (Morales Velasco, 2016). La naturaleza de la sustancia, su estado de agregación y la presencia de una fuente de ignición en las cercanías caracterizará al evento accidental final – incendios, explosiones y/o dispersión de tóxicos - (Vílchez et al., 2011). Para reducir los daños ocasionados se han propuesto diferentes medidas de mitigación y protección hacia el receptor, clasificándose en activas, pasivas e inherentes (Lim et al., 2019). Sin embargo, debe asegurarse su efectividad evitando la redundancia innecesaria, ya que su aplicación incrementa los costos de la instalación de la planta.

En el diseño, comúnmente se recurre a la combinación de distancias seguras entre posibles fuentes de peligro – receptor, dado un nivel de daño mínimo/ aceptable y la instalación de sistemas de mitigación y protección. Es decir, dada la ocurrencia de un incendio por ejemplo se pueden establecer distancias que garanticen un impacto leve junto a sistemas de extinción de incendios (uso de espumas autoexpandibles), barreras de aislamiento térmico que protegen contra el aumento de temperatura del material del recipiente en contacto con la sustancia almacenada o paredes contra-incendios que intersectan al fuego/ reducen el factor de visión (Spitzenberger et al., 2016).

En este trabajo, se presenta el estudio de la relación entre distancias de separación, intensidad de radiación térmica y la influencia de la reducción del factor de visión considerando la posible ocurrencia de una bola de fuego – dada la falla de un recipiente a presión que contiene líquido sobrecalentado e inflamable-, proponiendo un modelo simple que relacione dichas variables. Tal relación se deduce de la implementación de un modelo referencia ampliamente aceptado en la bibliografía especializada.

El estudio del flujo de radiación emitido por una bola de fuego en función de la distancia se efectúa empleando el modelo de llama sólida basado en la hipótesis de que la radiación es emitida desde la superficie de un cuerpo gris inmóvil, asumiendo una forma esférica, dadas las características del evento (Casal, 2018).

La presencia de una obstrucción entre el flujo radiante de la esfera (por ejemplo: pared contra incendios) ocasiona la reducción del factor de visión, una de las variables más influyentes al estimar la radiación recibida por el receptor ubicado a cierta distancia. La metodología de cálculo de dicha variable se desarrolló por Vílchez et al. (2018), proponiendo una relación entre el máximo factor de visión (sin presencia de obstrucción) y el factor de visión dada la anteposición de un objeto entre la bola de fuego y el receptor de interés. Tal reducción es de importancia al momento de considerar la disminución de la radiación térmica incidente sobre el receptor y por ende la minimización de la distancia segura a emplear en el diseño de la planta o en caso de una industria en funcionamiento se podría evaluar para una distancia fija la relación de factor de visión que garantiza un nivel de daño aceptable.

Desarrollo

La obtención de una relación simple entre las variables de interés: distancia, intensidad de radiación térmica y fracción de factor de visión se efectuó en tres etapas: *implementación del modelo de referencia* (modelo de llama sólida) en modo simulación considerando un amplio rango de aplicación mediante la parametrización de las variables de entrada de acuerdo a casos de accidentes históricos como casos hipotéticos (Alileche et al., 2017; Birk et al., 2013; Török et al., 2011); *análisis de las variables más influyentes* sobre el valor de la intensidad de radiación recibida y finalmente *propuesta de una ecuación simple* que las relacione con parámetros a determinar por medio de la implementación de un modelo de optimización.

Primera etapa: Implementación del Modelo de llama sólida

Este modelo estudia a la bola de fuego como un cuerpo de geometría esférica, caracterizando al mismo en función del diámetro D_{BF} , su elevación respecto al nivel del suelo H_{BF} y el tiempo de duración del evento t_{BF} (Ec. 1, 2 y 3) (Sellami et al., 2018).

$$D_{BF} = 6.14 \cdot m_T^{0.325} \quad (1)$$

$$H_{BF} = 0.75 \cdot D_{BF} \quad (2)$$

$$t_{BF} = 0.41 \cdot m_T^{0.340} \quad (3)$$

Para el cálculo de estas variables se partió de la parametrización de volúmenes de tanque entre 50 a 1500 m³ para obtener la cantidad de materia involucrada (m_T) de acuerdo a las condiciones típicas de almacenamiento estudiando siete sustancias (metano, etano, etileno, propano, propileno, butano, isobutano) identificándolas con el subíndice $i = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$.

Luego, se procede a estimar la radiación térmica recibida q_r (Ec. 4) (Casal, 2018) por un receptor ubicado a una distancia d del accidente tomando esta última valores de 100 a 1000 m.

$$q_r = E_p F_{v_{max}} \tau_{atm} \quad (4)$$

Donde E_p es el poder emisivo, $F_{v_{max}}$ el factor de visión máximo (sin obstrucciones) y τ_{atm} la transmisividad atmosférica.

Luego el poder emisivo se calcula de acuerdo a la Ec. 5, el factor de visión empleando la Ec. 6 y la transmisividad atmosférica con la Ec. 7.

$$E_p = \frac{0.27 \cdot P_{rupt}^{0.32} \cdot m_T \cdot \Delta H_c}{\pi \cdot D_{BF}^2 \cdot t_{BF}} \quad (5)$$

$$F_{v_{max}} = \frac{D_{BF}^2}{4 (H_{BF}^2 + d^2)} \quad (6)$$

$$\tau_{atm} = 2.02 \left[P_w \left(\sqrt{H_{BF}^2 + d^2} - 0.5 D_{BF} \right) \right]^{-0.09} \quad (7)$$

Representando P_{rupt} la presión de falla del recipiente (1.1 MPa para metano, etano y etileno y 2 MPa para las sustancias restantes), ΔH_c el calor de combustión de la sustancia involucrada i y P_w la presión de vapor de agua en la atmósfera.

El modelo se implementó en el software GAMS (General Algebraic Modeling System), en modo simulación empleando como función objetivo una variable muda. Se adicionó la parametrización de la relación R_f entre el factor de visión con obstrucción y el factor de visión máximo ($F_{v_{max}}$) de 0 a 1 con $\Delta = 0.1$.

Se obtuvieron 3500 valores de intensidad de radiación térmica incidente q_r para analizar en la etapa siguiente.

Segunda etapa: Análisis de las variables más influyentes en la estimación de intensidad de radiación

A continuación, en la Figura 1, para el caso de una explosión seguida de una bola de fuego de un tanque de 500 m³ que contiene metano, se muestra la influencia de la reducción del factor de visión dada una distancia de separación entre la fuente de peligro (generación de bola de fuego) y el receptor estudiado, analizando el cociente entre el factor de visión real (presencia de obstrucción) y el factor de visión máximo (sin obstáculos) $-R_f-$. Similares tendencias se obtienen con las restantes sustancias estudiadas.

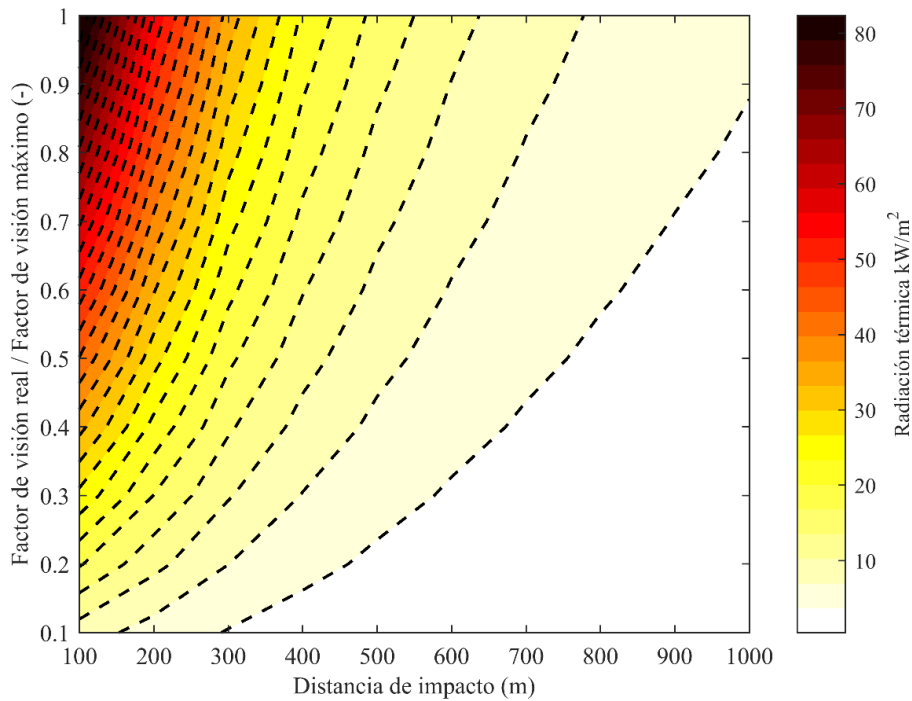


Figura 1. Curvas de isorradiación dada una bola de fuego producto de la explosión de un tanque de 500 m³ de metano.

Del análisis de los datos obtenidos, para una cantidad constante de materia involucrada, se tiene que entre la distancia d y el cociente de factores de visión R_f se presenta una relación potencial. Del mismo modo entre distancia d y radiación térmica q_r . Estas relaciones se mantienen en todo el rango de volúmenes de tanque estudiados.

Observando los valores de intensidad de radiación térmica para distintos volúmenes de tanque, se puede proponer una relación lineal con el diámetro de la bola de fuego (D_{BF}) dada una R_f y para todo el rango de distancias.

Tercera etapa: Propuesta del Modelo Simple

De acuerdo las relaciones inferidas, se propone la siguiente ecuación con parámetros a determinar a y b para cada sustancia i considerada:

$$q_r = a_i \cdot D_{BF} \cdot R_f \cdot d^{b_i} \tag{8}$$

La función objetivo es el coeficiente de determinación R^2 (Kvålseth, 1985; Li, 2017) solicitando su maximización empleando el resolvidor local CONOPT (Drud, 1994) disponible en el software GAMS.

Resultados

Los parámetros del modelo simple para estimar distancias de impacto se presentan en la siguiente tabla. El valor de la función objetivo R^2 es de 0.926, resultando en un ajuste aceptable con respecto a los datos brindados por el modelo de referencia.

	Metano	Etano	Etileno	Propano	Propileno	Butano	Isobutano
a	18.840	13.613	12.908	17.449	16.739	16.105	16.463
b	-0.927	-0.879	-0.871	-0.893	-0.888	-0.882	-0.886

Tabla 1. Solución del modelo de optimización. Parámetros del Modelo Simple.

A continuación, en la Figura 2 se presenta el ajuste para el caso de la formación de una bola de fuego dada la explosión de un tanque de propileno (1500 m³), los puntos representan los valores arrojados por el modelo de referencia mientras que la superficie

representa la ley del modelo simple. Se observa una disminución importante de la distancia de impacto en función de la relación de factor de visión. Por ejemplo, en caso de no presentarse una obstrucción dado un impacto de 10 kW/m^2 se obtienen distancias superiores a los 1000 m, con una relación de factor de visión de 0.5 tal distancia disminuye a 700 m y para un valor de 0.1 a unos 200 m no se alcanza tal valor de radiación térmica incidente. Luego, restaría estimar las dimensiones de la obstrucción y su ubicación, un estudio desarrollado por Vílchez et al. (2018).

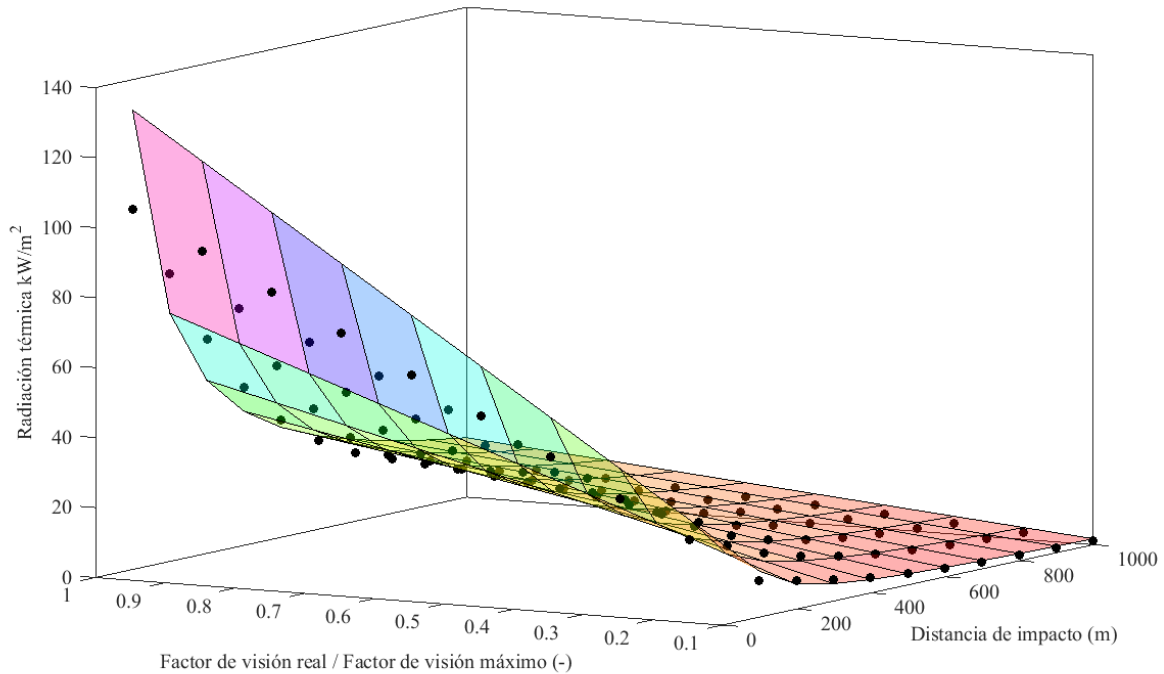


Figura 2. Radiación térmica incidente dada una explosión – bola de fuego de un tanque de propileno (1500 m^3).

Conclusiones

En este trabajo se logró hallar una relación plasmada en una ecuación simple entre variables importantes en etapas de diseño de planta (distancia de separación, flujo de radiación térmica incidente y cociente de factores de visión). De esta forma se facilita el cálculo de distancias seguras dada un nivel de impacto aceptable considerando la conveniencia de la presencia de un obstáculo (por ejemplo: paredes contraincendios) analizando la minimización del costo de instalación. Tal ecuación simple se debe emplear para las sustancias estudiadas. Finalmente, se está analizando para futuros trabajos estimar la configuración de los obstáculos junto con la reducción de las distancias seguras en forma simple.

Referencias

- Alileche, N., Olivier, D., Estel, L., Cozzani, V., 2017. Analysis of domino effect in the process industry using the event tree method. *Saf Sci* 97, 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.12.028>
- Birk, A.M., Dusserre, G., Heymes, F., 2013. Analysis of a propane sphere BLEVE. *Chem Eng Trans* 31, 481–486.
- Casal, J., 2018. Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants, 2nd ed. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- Drud, A., 1994. CONOPT - A Large- Scale GRG Code. *ORSA J. Comput.* 6, 207–216. <https://doi.org/10.1287/ijoc.6.2.207>
- Kvålseth, T.O., 1985. Cautionary Note about R2. *Am. Stat.* 39, 279–285. <https://doi.org/10.1080/00031305.1985.10479448>
- Li, J., 2017. Assessing the accuracy of predictive models for numerical data: Not r nor r2, why not? Then what? *PLOS ONE* 12, 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183250>
- Lim, J.W., Baalisampang, T., Garaniya, V., Abbasi, R., Khan, F., Ji, J., 2019. Numerical analysis of performances of passive fire protections in processing facilities. *J. Loss Prev. Process Ind.* 62. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.103970>
- Morales Velasco, M.X., 2016. Efecto de las ondas de presión de una explosión sobre tanques de almacenamiento de sustancias peligrosas. Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca.

- 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, 771–779. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.02.003>
- Spitzenberger, C., Johnson, C., Le, M., Mshelia, A., Pitblado, R., 2016. Strike the right balance between active and passive fire protection. *Chem Eng Prog* 112, 61–68.
- Török, Z., Ajtai, N., Turcu, A.T., Ozunu, A., 2011. Comparative consequence analysis of the BLEVE phenomena in the context on Land Use Planning; Case study: The Feyzin accident. *Process Saf. Environ. Prot.* 89, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2010.08.003>
- Vílchez, J.A., Espejo, V., Casal, J., 2011. Generic event trees and probabilities for the release of different types of hazardous materials. *J. Loss Prev. Process Ind.* 24, 281–287. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2011.01.005>
- Vílchez, J.A., Muñoz, M.A., Bonilla, J.M., Planas, E., 2018. Configuration factors for ground level fireballs with shadowing. *J. Loss Prev. Process Ind.* 51, 169–177. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.12.010>