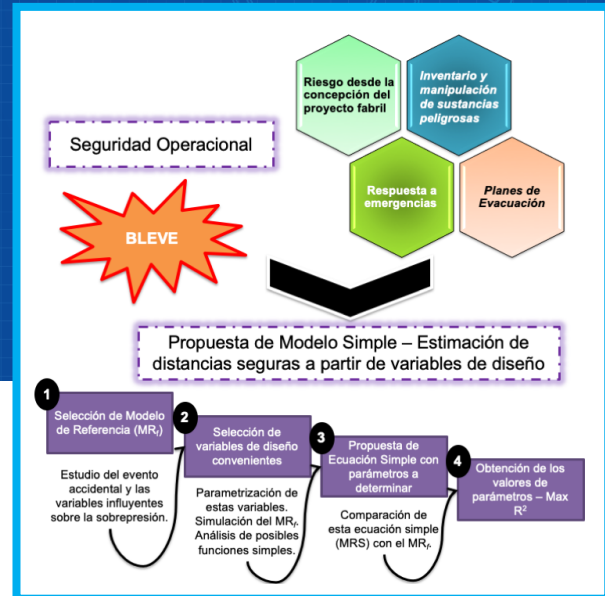


BLEVE – Estimación de distancias seguras basándose en variables de diseño

Romina A. Kraft, Patricia L. Mores, Nicolás J. Scenna

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

Contacto: rkraft@frrro.utn.edu.ar
mores@inv.rosario-conicet.gov.ar
nscenna@frrro.utn.edu.ar



RESUMEN

Entre los eventos accidentales más peligrosos se encuentran las explosiones BLEVE. Las graves consecuencias ocasionadas por la onda expansiva generada hacen indispensable su análisis. Los modelos matemáticos disponibles son complejos en cuanto a la cantidad de datos y esfuerzo computacional requeridos para su resolución. En este trabajo, se presenta un modelo simple y directo para la estimación de distancias seguras entre una fuente de explosión y un receptor caracterizado por el nivel de vulnerabilidad. La obtención del mismo se lleva a cabo mediante la selección de variables de diseño convenientes y el análisis de su influencia en los resultados brindados por un modelo matemático con fundamento teórico (modelo base), la formulación de una única expresión matemática con parámetros a determinar (modelo simple) y la resolución de un problema de optimización en el que se maximiza el R^2 que resulta de la comparación entre ambos modelos. Finalmente, se demuestra una muy buena performance del modelo propuesto, permitiendo la obtención confiable de distancias seguras desde las primeras etapas del diseño.

ABSTRACT

Among the most hazardous accidental events are BLEVE. The serious consequences caused by the blast wave generated make their analysis crucial. The available models are complex in terms of the amount of input data and computational efforts required for their resolution. In this study, a simple to implement model for the straightforward estimation of safety distances between a explosion source and a receptor characterized by a specified vulnerability level is presented. This model is obtained by selecting suitable design variables and analysing their influence on the results provided by a mathematical model with theoretical foundation (reference model), formulating a single mathematical expression with parameters to be determined (simple model) and by solving an optimization problem in which the correlation coefficient resulting from the comparison of the simple model with the reference one is maximized. Finally, a very good performance of the proposed model is demonstrated, allowing the reliable obtaining of safety distances from the first stages of the design.

Palabras clave: BLEVE, modelo simple, distancias seguras, variables de diseño/operativas.

INTRODUCCIÓN

Lograr el desarrollo sostenible en toda actividad industrial, actualmente es foco de preocupación, fomentando la generación de nuevos métodos de diseño y gerenciamiento operacional. Es más, resulta crecientemente compleja la gestión privada y pública sin disponer de métodos adecuados para el manejo de situaciones de riesgo tecnológico; esto es, la disponibilidad de herramientas informáticas para la toma de decisiones rápida y eficazmente ante la urgencia que caracteriza a los accidentes industriales.

Frente a esta problemática, una contribución muy importante y central es la obtención de metodologías eficaces que permitan cuantificar el impacto sobre un receptor específico ubicado a una cierta distancia del evento accidental o bien estimar distancias de seguridad en función de un nivel de vulnerabilidad establecido para el receptor, de tal manera que su implementación en problemas de síntesis y diseño garanticen simultáneamente confiabilidad en los resultados y minimización de los costos.

Para cumplir con esos requisitos, se presenta en este trabajo una metodología para la obtención de un modelo sencillo de utilizar y eficaz, que permita la evaluación de las consecuencias del evento BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion). En efecto este modelo debe ser confiable, asegurando una sobreestimación con un cierto grado máximo conocido de error tomando como referencia los valores provistos por uno de los modelos matemáticos ampliamente aceptados en la literatura según el estado del arte denominado modelo de referencia- MR_r - y generales -válidos para diferentes condiciones y rango de valores adecuados para las variables involucradas-, contemplando sustancias comúnmente empleadas en la industria. Es importante además resaltar que la necesidad de este tipo de modelos se manifiesta en la práctica tanto en el Análisis Cuantitativo de Riesgos (QRA) – estimación del campo de sobrepresiones generado- como en el diseño inherentemente seguro – estimación de distancias seguras -. Si bien el primer caso es el habitual en la orientación de cálculo contando con un gran número de modelos matemáticos propuestos; el segundo caso o modalidad se lleva a cabo hasta el momento mediante la implementación de los modelos anteriores obligando en la práctica a incurrir en cálculos complejos e iterativos.

Dentro de este contexto, se busca desarrollar un modelo matemático simple que permita la obtención directa de distancias seguras en función de variables de diseño fácilmente accesibles y el nivel de vulnerabilidad que caracterice al receptor de interés, denominando a éste: Modelo Reducido Simple (MRS).

DESARROLLO

Para la obtención de un modelo simple efectivo, se debe tener en cuenta los siguientes aspectos: selección del MR_r sobre el cual se efectuará el ajuste y la determinación de los datos de entrada que sean de fácil acceso y representativos de una de las etapas del accidente pudiendo de esta forma captar las relaciones subyacentes presentes en el MR_r con la mayor exactitud posible.

Selección del MR_r

En la bibliografía especializada se cuenta con una gran cantidad de modelos matemáticos para estimar la sobrepresión generada a una distancia dada de la fuente de explosión que cubren un amplio espectro en cuanto a las hipótesis adoptadas y el grado de rigurosidad de los mismos, diferenciándose entre los modelos empíricos/semiempíricos, modelos termodinámicos y modelos basados en balances de cantidad de movimiento (ecuaciones diferenciales).

Entre los más utilizados se encuentran las combinaciones en serie de modelos termodinámicos para la obtención de la energía mecánica total liberada al momento de la explosión y métodos gráficos para la conversión de esta energía en sobrepresión.

Para el cálculo de la energía mecánica liberada y de acuerdo a la definición de BLEVE (resultado de la falla de un recipiente que contiene un líquido a una temperatura muy superior a su temperatura normal de ebullición [1]) sobresalen en cuanto a la explicación de la procedencia de esta energía tres puntos de vista bien diferenciados. Por ejemplo, Birk et al. (2018, 2007) [2], [3] asumen que la misma proviene solamente de la expansión del vapor preexistente, mientras que Casal y Salla (2006) [4] suponen que la violenta liberación de energía es consecuencia solamente de la vaporización instantánea del líquido sobrecalentado. El tercer caso corresponde a modelos que consideran el aporte de ambos fenómenos expansión y vaporización, siendo las propuestas más reconocidas las reportadas por Planas-Cuchi et al. (2004) y Prugh (1991) [5], [6].

Otra diferencia en las hipótesis que influencia fuertemente en los resultados es la definición del comportamiento ideal/ no ideal del gas. Están aquellos que consideran un comportamiento ideal [6]–[10] y aquellos que arrojan resultados más realistas bajo la hipótesis de gas no ideal [3]–[5], [11].

Una vez cuantificada la energía liberada se debe estimar el campo de sobrepresiones que se origina por método gráfico. Los más utilizados ante este tipo de explosiones son el método TNT equivalente y el método de Sachs [12], [13].

Por otra parte, si se pretende una mayor rigurosidad, pueden utilizarse modelos más complejos como por ejemplo el modelo de Sedov-Taylor, que emplean resolución numérica por métodos CFD [14]–[17]. No obstante, debido al consumo de recursos computacionales y la necesidad de copiosa cantidad de datos, además de su complejidad intrínseca. Estos son utilizados muy ocasionalmente en la etapa de análisis de riesgos, por ejemplo, para evaluar diseños específicos en una etapa avanzada, en situaciones muy especiales. De hecho, Reniers y Cozzani (2013) [18] destacan la precisión de estos modelos para estimar niveles de sobrepresión a distancias cercanas al evento accidental pero remarcan también que a distancias mayores los resultados son muy similares a los arrojados por los demás modelos matemáticos disponibles.

Luego de acuerdo a los objetivos de este trabajo, el Modelo de Referencia - MR_f – más adecuado de acuerdo a su gran aceptación en la bibliografía especializada y a la demanda no excesiva de propiedades termodinámicas (volumen y energía interna específica del vapor y del líquido a diferentes condiciones, entre otras), es el modelo propuesto por Planas-Cuchi et al. (2004) [5], el cual supone una expansión adiabática irreversible para la estimación de la energía mecánica total liberada combinado con el Método TNT equivalente [1]. Esta metodología ha sido ampliamente empleada evaluando la concordancia de sus resultados con datos de accidentes históricos o datos experimentales [12], [19]–[21] como así también ha sido utilizada esta combinación como Modelo de Referencia para llevar a cabo diversas comparaciones [22]–[25].

En la Figura 1, se observa la constitución del MR_f , en este trabajo se obtiene una correlación del método gráfico TNT Equivalente para sistematizar la implementación de la combinación.

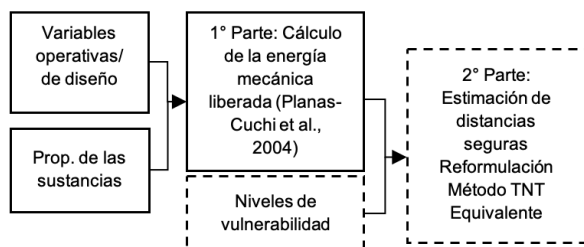


Figura 1 Esquema básico del MR_f .

Determinación de los datos de entrada del MRS

Un aspecto importante de la simplicidad del modelo a obtener es la cantidad de datos de entrada necesarios junto con su accesibilidad. Para ello se seleccionan variables de diseño que se puedan relacionar con alguna de las condiciones del evento:

condición justo antes de la explosión - β - y condición final - γ - o con el estado base que se considera: condición normal de almacenamiento - α -. Esto asegura la parametrización de los datos de entrada del MR_f cerrando los grados de libertad del mismo para ejecutarlo en modo simulación, pudiendo analizar la influencia sobre la distancia segura estimada por el MR_f de las variables de diseño seleccionadas como datos de entrada del MRS.

Inicialmente dado que se conoce que la naturaleza de la sustancia involucrada en la explosión tiene una injerencia importante en la fuerza de la misma y por tanto en el cálculo de las distancias seguras, se seleccionan las sustancias típicamente involucradas en este tipo de explosiones. De hecho, en el trabajo de Hemmatian et al. (2019) [26] se resalta la diferencia existente entre BLEVEs de agua y de propano. Luego, se toman 11 sustancias: metano, etano, etileno, propano, propileno, butano, isobutano, amoníaco, cloruro de vinilo, cloro y agua. En adelante, cada sustancia se identifica con el subíndice i , con ($i=1,2,\dots,11$) respectivamente.

Condición justo antes de la explosión - β

Considerando equilibrio líquido-vapor justo antes de la explosión, definiendo el valor de la temperatura o la presión interna en el recipiente justo antes de que ocurra la falla; es posible determinar las propiedades termodinámicas de la sustancia, requeridas por el MR_f para estimar la energía mecánica liberada. Se emplea la presión de falla como variable determinante, dado que los valores que toma la misma, al momento de efectuar el análisis de riesgos, pueden estimarse utilizando expresiones simples como las propuestas en TNO (2005) [27]. En este trabajo se contemplan los datos reportados en la literatura [3], [5], [22], [23], [28], [29], tanto de casos experimentales como hipotéticos, en un rango cubierto por cuatro valores: $P_{rupt,i} = 1.25, 1.50, 1.75, 2.00$ MPa, con $j = 1, 2, \dots, 4$ respectivamente.

Condición final de explosión - γ

La condición final de acuerdo al MR_f (expansión adiabática irreversible), se determina para cada sustancia i a presión atmosférica (P_{atm}) y temperatura normal de ebullición (T_b^Y). Es decir, que para el MRS no existirá una variable de diseño representativa, solamente los resultados serán influenciados por el tipo de sustancia involucrada.

Condición normal de almacenamiento - α -

El objetivo de la definición de las condiciones típicas de almacenamiento para cada sustancia radica en la posibilidad de cuantificar la cantidad de masa involucrada (dato de entrada del MR_f) en variables operativas empleadas en la cotidianeidad de la actividad fabril. Para ello, se asumen las siguientes condiciones de acuerdo al extenso análisis realizado por Mannan (2012) [30], almacenamiento re-

frigerado: metano ($i=1$), etano ($i=2$), etileno ($i=3$), almacenamiento a presión y temperatura ambiente ($15\text{ }^{\circ}\text{C}$): propano ($i=4$), propileno ($i=5$), butano ($i=6$), isobutano ($i=7$), amoníaco ($i=8$), cloruro de vinilo ($i=9$), cloro ($i=10$). Para el agua ($i=11$) se asume la condición normal de ebullición: 100°C y presión atmosférica.

Una vez fijadas las condiciones normales de almacenamiento para cada una de las sustancias consideradas, las variables operativas que cuantifican la cantidad de masa involucrada son: el volumen de recipiente

$V_{Rk} [\text{m}^3] = [0.005 \ 5 \ 40 \ 135 \ 320 \ 625 \ 1070 \ 1815 \ 2560]$ con $K=1,2, \dots, 9$ y el nivel de líquido más conservador para cada sustancia a las condiciones de almacenamiento

$(T_{Di}^{\alpha}) [0.76 \ 0.76 \ 0.76 \ 0.80 \ 0.80 \ 0.74 \ 0.75 \ 0.80 \ 0.80 \ 0.80 \ 0.80]$

Para seis de las sustancias consideradas: propano ($i=4$), propileno ($i=5$), amoníaco ($i=8$), cloruro de vinilo ($i=8$), cloro ($i=10$), agua ($i=11$) se toma el valor de 0.80 como conservador de acuerdo a la literatura especializada [28], [31] mientras que en los casos de metano ($i=1$), etano ($i=2$), etileno ($i=3$), butano ($i=6$) e isobutano ($i=7$) este nivel no es posible (asumiendo como hipótesis que no existe escape previo de materia justo antes de la explosión) porque el recipiente se llena completamente de líquido antes de alcanzar algunas de las presiones de falla estipuladas (escenario justo antes de la explosión - β -) [22], adoptando valores inferiores estimados de acuerdo a la siguiente expresión:

$$F_{Di}^{\alpha} < \frac{v_{Li}^{\alpha} [v_{Vi}^{\alpha} - v_{Li \ 2 \ MPa}^{\beta}]}{v_{Li \ 2 \ MPa}^{\beta} [v_{Vi}^{\alpha} - v_{Li}^{\alpha}]} \quad (1)$$

donde $\bar{v}_{Vi}^{\alpha}$ y $\bar{v}_{Li}^{\alpha}$ representan el volumen específico del vapor y del líquido en las condiciones de almacenamiento - α - y $\bar{v}_{Li \ 2 \ MPa}^{\beta}$ el volumen específico del líquido en las condiciones iniciales de explosión - β - (presión de falla máxima considerada 2 MPa).

Finalmente resta caracterizar al tipo de receptor y la intensidad de daño considerados (muerte, daños estructurales leves/ importantes/ graves, daño mínimo/ grave/ colapso de equipo). Para ello, se relacionan los valores de sobrepresión en función del criterio de vulnerabilidad adoptado. Existen diversas formas de establecer valores de sobrepresión; por ejemplo: por medio del método PROBIT, por recopilación de datos históricos y/o contemplar los valores umbrales establecidos por diversas normativas. En la Tabla 1 se indican los valores y el rango de sobrepresión seleccionados (ΔP_l con $l = 1, 2, \dots, 8$), a partir de las diversas fuentes mencionadas. Se ha considerado el Decreto Ministerial

de Francia (2005) [32] empleado frecuentemente [33]–[36]. También se han incorporado para el análisis, valores calculados a partir del Método PROBIT [18] y datos de accidentes históricos [37], [38].

Tabla 1 Vulnerabilidad del receptor

Tipo de consecuencia	$\frac{\Delta P_l}{\Delta P_l}$ (kPa)
Efectos perceptibles sobre personas/ Daños estructurales leves	5,00
Daños estructurales importantes	14,00
Daños leves a equipos alargados (torres de absorción o de destilación)	17,00
Comienzo de la letalidad	20,00
Desplazamiento de un reactor químico y ruptura de sus conexiones (tuberías)	27,60
Daños leves a equipos presurizados	35,00
Desplazamiento de un intercambiador de calor y ruptura de sus conexiones (tuberías)	51,70
100% de daños a máquinas pesadas	70,00

Dentro de este contexto, expuesto el conjunto de variables relevantes para la descripción del evento BLEVE, y determinado para cada una de ellas el intervalo de valores a considerar estableciendo mediante parametrización, puntos discretos para su evaluación, queda definido el espacio o región que se utiliza para la obtención de los parámetros del MRS. En otras palabras, su rango de validez de aplicación. Luego, para poder implementar simulaciones a partir de tales variables de entrada, deben adicionarse además un conjunto de datos necesarios para anular los grados de libertad del MR_f (propiedades termodinámicas, propiedades físicas, etc.) en concordancia con la parametrización de las variables de interés anteriormente especificadas.

De esta manera, para cada valor del conjunto definido de variables de entrada, es posible obtener los valores correspondientes para las distancias, a partir de la resolución del MR_f . Esta tarea se lleva a cabo implementando dicho modelo en el ambiente de programación GAMS (General Algebraic Modeling System). El modelo se ejecuta en modo simulación (mediante el empleo de una función objetivo muda). Se incluyen las correspondientes restricciones de igualdad relacionadas con las ecuaciones que definen el MR_f y se ingresan los valores específicos de cada variable producto de la discretización realizada como parámetros del problema. Igualmente, con las propiedades de las sustancias consideradas y demás datos para cerrar los grados

de libertad del modelo. Estos parámetros o puntos de evaluación producto de la partición del espacio de aplicación establecido, se corresponden con un total de 3168 puntos de evaluación (distancias estimadas por el MR_f).

Análisis de la influencia de las variables seleccionadas

En este punto se evalúa la influencia de las variables de interés: volumen del recipiente (V_R) - cuantificación de la cantidad de sustancia involucrada -, presión de falla (P_{rupt}) - escenario de explosión β - y sobrepresión (ΔP) - caracterización del receptor. Se grafica la variación de los valores de distancias seguras estimadas por las simulaciones del MR_f en función de cada una de estas variables, manteniendo las restantes en un valor constante. En la Figura 2 se observa una relación lineal entre la raíz cúbica del volumen del recipiente y la distancia segura. En la Figura 3 se percibe una tendencia lineal entre la presión de falla y la distancia segura. Y finalmente, en la Figura 4 se puede inferir una relación potencial entre la sobrepresión (vulnerabilidad del receptor) y la distancia segura.

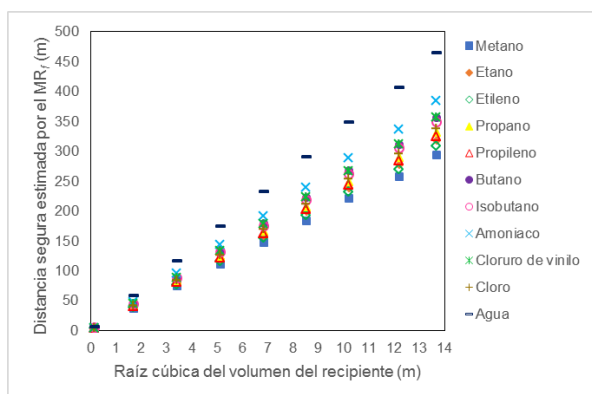


Figura 2 Relación entre la raíz cúbica del volumen y la distancia segura estimada por el MR_f ($P_{ruptj=3} = 1,75 \text{ MPa}$ y $\Delta P_{l=1} = 5 \text{ kPa}$).

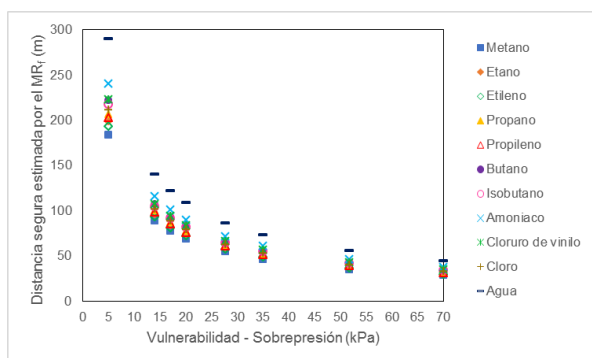


Figura 3 Relación entre la presión de falla y la distancia segura estimada por el MR_f ($V_{Rk=6} = 625 \text{ m}^3$ y $\Delta P_{l=1} = 5 \text{ kPa}$).

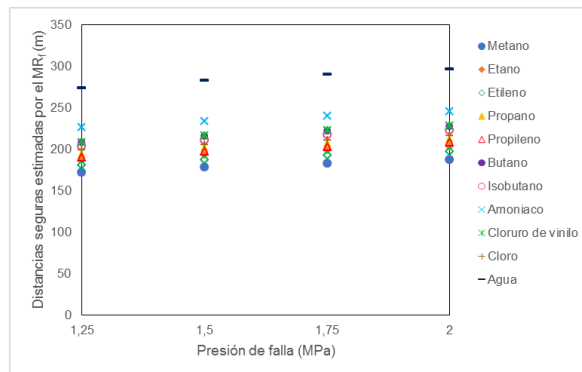


Figura 4 Relación entre la vulnerabilidad del receptor y la distancia segura estimada por el MR_f ($V_{Rk=6} = 625 \text{ m}^3$ y $P_{ruptj=3} = 1.75 \text{ MPa}$).

Propuesta del MRS. Desarrollo del problema de optimización

Se presenta la siguiente relación con parámetros a determinar mediante la comparación con los resultados arrojados por el MR_f dentro del rango de aplicación definido.

$$d_{MRS_{ij,k,l}} = (F_{si} + a_2 \cdot P_{ruptj} + a_3) \cdot \Delta P_l^{a_1} \cdot \sqrt[3]{V_{Rk}} \quad (2)$$

Donde se sostiene lo inferido en la sección anterior: relación lineal con la raíz cúbica del volumen del recipiente ($\sqrt[3]{V_{Rk}}$), relación potencial con la vulnerabilidad ($\Delta P_l^{a_1}$) representando a_1 el exponente de esta tendencia -variable de optimización- y una funcionalidad lineal con la presión de falla (P_{ruptj}) con una pendiente a_2 y una ordenada a la origen compuesta por un parámetro de ajuste residual a_3 y el factor naturaleza de la sustancia F_{si} , dado que como se observa en las Figuras 2, 3, 4 existen diferencias de acuerdo a la sustancia de la que se trate.

Ahora bien, este último factor debe definirse utilizando propiedades físicas/termodinámicas de fácil acceso, para no restarle simplicidad al modelo a obtener.

Bajo estas premisas, las variables termofísicas relevantes respecto al fenómeno BLEVE son las que se asocian a una violenta vaporización instantánea de líquido sobrecalentado, debido a una modificación de las condiciones justo antes de la explosión (sistema bifásico sometido a altas presiones) a la condición final correspondiente a la presión atmosférica ($\beta \rightarrow \gamma$) como consecuencia de la ruptura del recipiente, ocurriendo una evolución adiabática en las condiciones γ . El calor de vaporización (λ_i^Y) es cedido por la fracción de líquido restante que se enfría ($Cp_{L_i}^Y \cdot \Delta T$) hasta su temperatura normal de ebullición ($T_{b,i}^Y$). Luego, se estudia la influencia de las tres propiedades y de

acuerdo a la bondad del ajuste, se decide utilizar las tres como factores con diferentes exponentes, es decir:

$$FS_i = \left[Cp_{L_i}^Y \right]^{a_4} \left[\lambda_{i_i}^Y \right]^{a_5} \left[T_{b_i}^Y \right]^{a_6} \quad (3)$$

Incorporándose nuevos parámetros a determinar (a_4, a_5, a_6). Luego, la expresión general que conforma el MRS, para el cálculo de la distancia segura, se indica en la siguiente ecuación:

$$d_{MRS_{i,j,k,l}} = \left(\left[Cp_{L_i}^Y \right]^{a_4} \left[\lambda_{i_i}^Y \right]^{a_5} \left[T_{b_i}^Y \right]^{a_6} + a_2 P_{rupt_i} + a_3 \right) \Delta P_i^{a_1} \sqrt[3]{V_{Rk}} \quad (4)$$

Una vez propuesta la expresión matemática y para la obtención de los parámetros óptimos correspondientes, resta definir la función objetivo y plantear el problema de optimización para lograr el mejor ajuste.

Para ello se adopta, el coeficiente de correlación (R^2), que se interpreta como la proporción del total de la variación de los valores estimados ($d_{MRf_{i,j,k,l}}$) por el MR_f respecto a su media aritmética $\overline{d_{MRf}}$ explicada por el modelo analizado MRS. Por lo tanto, valores cercanos a la unidad son los deseados. La definición expuesta se deduce de la siguiente fórmula [39], [40]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{l=1}^8 \sum_{k=1}^9 \sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^{11} (d_{MRf_{i,j,k,l}} - d_{MRS_{i,j,k,l}})^2}{\sum \sum \sum \sum (d_{MRf_{i,j,k,l}} - \overline{d_{MRf}})^2} \quad (5)$$

Finalmente, como restricción para que el MRS sea conservador y dé resultados confiables se asegura una cota mínima y máxima de las distancias estimadas.

$$d_{MRS_{i,j,k,l}} \geq d_{MRf_{i,j,k,l}} \quad (6)$$

$$d_{MRS_{i,j,k,l}} \leq FOS \cdot d_{MRf_{i,j,k,l}} \quad (7)$$

Lograda la convergencia para un valor inicial de FOS, se resuelven una serie de problemas reduciendo el valor del mismo hasta que no sea posible hallar una solución factible. Luego para este caso particular el valor de FOS es igual a 1.08, es decir por debajo de este número el problema de optimización no converge.

RESULTADOS

El problema de optimización se implementó en GAMS utilizando el resolutor no-lineal CONOPT, siendo éste un algoritmo de optimización local basado en el método del gradiente reducido generalizado [41].

Se ha obtenido un valor muy cercano a 1 ($R^2 = 0,998$) de la FO (Ec. 5) y con respecto a la convergencia, la solución óptima se localiza en un punto extremo o esquina del área factible, es decir que está deter-

minada únicamente por la saturación de dos o más restricciones.

En la Tabla 2 se indican los parámetros óptimos obtenidos (asociados a la Ec. 4).

Tabla 2 Valores obtenidos del modelo implementado en GAMS.

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
-0,708	8,903	22,879	-0,112	0,217	0,456

Validación del MRS. Accidente de Zarzalico, España

Alrededor del 47% de las explosiones tipo BLEVE que han ocurrido de acuerdo a un análisis de accidentes históricos, se han manifestado en el sector transporte [42]. Es ya muy conocida la secuencia de sucesos que produce eventos accidentales mayores cuando camiones cisterna (o vagones de carga) que transportan una sustancia inflamable sufren un accidente de tránsito o un descarrilamiento. El evento potencial más relevante es una BLEVE [43].

En este trabajo, con el objeto de verificar los resultados del MRS, se toman datos del accidente histórico de transporte ocurrido en Zarzalico, España [21]. En este accidente se ve involucrado un camión cisterna que transportaba GNL a 1 bar de presión (refrigerado). De acuerdo con el citado trabajo, debido a la exposición al fuego durante aproximadamente 57 minutos, la sustancia almacenada perdió su refrigeración incrementando su temperatura y alcanzando la cisterna una presión interna elevada que culminó en una explosión del tipo BLEVE seguida de una bola de fuego.

Con respecto a los daños causados por la onda expansiva, objeto de estudio de este trabajo, se observó en función a lo reportado, daños en los marcos de grandes ventanales derribando paneles de cristales de gran espesor en una estación de servicio ubicada a 125 m del accidente. Para tal daño se estima un nivel de vulnerabilidad (cuantificado como sobrepresión) que oscila entre 2 a 3 kPa [21]. Se asume que el impacto a esa distancia se debe a que la onda de sobrepresión colisionó con un medio más denso que el aire (presencia de un banco de tierra y rocas de una altura de 10 m cerca del accidente), reflejando la onda en la dirección de la ubicación de la estación de servicios incrementando la sobrepresión. Esto se considera duplicando la energía mecánica efectiva involucrada en la explosión (MR_f adoptado) [21].

Dentro de este contexto, observando que la distancia calculada es proporcional a la raíz cúbica de la energía involucrada (MR_f), y que ésta debe afectarse aquí por un factor 2, se infiere que el resultado obtenido por la Ec. 4 (MRS) en estos casos debe ser afectado por el factor $\sqrt[3]{2}$.

Datos de entrada para la implementación del MRS:

Volumen del recipiente: 37,37 m³ (se calcula el volumen considerando las condiciones de almacenamiento adoptadas y una masa de 12000 kg)

Presión de falla: 0,7 y 0,91 MPa (válvulas de seguridad del camión cisterna). Estas presiones están fuera del rango de valores empleado para la obtención de los parámetros del modelo y se demostrará que la extrapolación arroja resultados aceptables.

Nivel de vulnerabilidad: 2,5 kPa.

Presencia de onda de difracción: sí.

Entonces, ingresando los valores de entrada en la Ec. 4 (MRS), se tiene:

$$\begin{aligned} d_{MRS}^* &= \sqrt[3]{2} \cdot (51,778 + 8,903 \cdot P_{rupt,k^*}) \cdot 1,747 \\ d_{MRS0,7 MPa}^* &= 127,7 \text{ m} \\ d_{MRS0,91 MPa}^* &= 131,8 \text{ m} \end{aligned} \quad (11)$$

Es decir que la distancia estimada por el MRS supera levemente los 125 m reales reportados para el citado accidente.

CONCLUSIONES

El Modelo Reducido Simple obtenido ha demostrado cumplir con los requerimientos de simpleza -con una sola ecuación puede estimarse directamente la distancia segura ante un evento accidental del tipo BLEVE y al mismo tiempo dicha ecuación solicita variables operativas comúnmente usadas y de fácil acceso-, confiable -garantizando como cota mínima las distancias estimadas por el Modelo de Referencia compuesto por una combinación de modelo matemático termodinámico [5] y el método gráfico TNT Equivalente [1] ampliamente aceptado en la bibliografía especializada- y útil al momento de no arrojar resultados sobredimensionados al tener una cota máxima del 8% con respecto a las distancias estimadas por el MR_r.

Este modelo ha sido validado empleando datos de un accidente histórico, arrojando resultados muy prometedores.

Finalmente, se percibe una gran simplicidad del MRS para poder ser integrado a modelos matemáticos más complejos (síntesis de procesos – diseño de layout) cuyos objetivos se encuentren orientados a la reducción de las consecuencias ocasionadas por este tipo de explosiones con efectos tan catastróficos.

AGRADECIMIENTOS

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

- [1] CCPS, *Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires and BLEVE's*. New York: American Institute of Chemical Engineers, 1994.
- [2] A. M. Birk, F. Heymes, R. Eyssette, P. Lauret, L. Aprin, y P. Slangen, «Near-field BLEVE overpressure effects: the shock start model», *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 116, pp. 727-736, 2018, doi: 10.1016/j.psep.2018.04.003.
- [3] A. M. Birk, C. Davison, y M. Cunningham, «Blast overpressures from medium scale BLEVE tests», *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 20, n.º 3, pp. 194-206, may 2007, doi: 10.1016/j.jlp.2007.03.001.
- [4] J. Casal y J. M. Salla, «Using liquid superheating energy for a quick estimation of overpressure in BLEVEs and similar explosions», *J. Hazard. Mater.*, vol. 137, n.º 3, pp. 1321-1327, 2006, doi: 10.1016/j.jhazmat.2006.05.001.
- [5] E. Planas-Cuchi, J. M. Salla, y J. Casal, «Calculating overpressure from BLEVE explosions», *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 17, pp. 431-436, 2004, doi: 10.1016/j.jlp.2004.08.002.
- [6] R. W. Prugh, «Quantitative evaluation of “BLEVE” hazards», *J Fire Prot Eng*, vol. 3, n.º 1, pp. 9-24, 1991, doi: 10.1177/104239159100300102.
- [7] H. L. Brode, «Blast wave from a Spherical Charge», *Phys. Fluids*, vol. 2, n.º 2, pp. 217-229, 1959, doi: 10.1063/1.1705911.
- [8] D. A. Crowl, «Using Thermodynamic Availability to Determine the Energy of Explosion for Compressed Gases», *Plant Oper Prog*, vol. 11, n.º 2, pp. 47-49, 1992, doi: 10.1002/prsb.720110206.
- [9] D. A. Crowl, «Using Thermodynamic Availability to Determine the Energy of Explosion», *Plant Oper Prog*, vol. 10, n.º 3, pp. 136-142, 1991, doi: 10.1002/prsb.720100306.
- [10] J. M. Smith y H. C. Van Ness, *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics*, 5th ed. New York: McGraw-Hill, 1996.
- [11] CCPS, *Guidelines for Vapor Cloud Explosion, Pressure Vessel Burst, BLEVE and Flash Fire Hazards.*, 2nd ed. New York: Wiley Company - American Institute of Chemical Engineers, 2010.
- [12] B. Hemmatian, E. Planas, y J. Casal, «Comparative analysis of BLEVE mechanical energy and overpressure modelling», *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 106, pp. 138-149, feb. 2017, doi: 10.1016/j.psep.2017.01.007.
- [13] D. Laboureur, F. Heymes, E. Lapebie, J. M. Buchlin, y P. Rambaud, «BLEVE overpressure: Multiscale comparison of blast wave modeling», *Process Saf. Prog.*, vol. 33, n.º 3, pp. 274-284, 2014, doi: 10.1002/prs.11626.
- [14] L. I. Sedov, *A Course in Continuum Mechanics*. Groningen: Wolters- Noordhoff, 1971.

- [15] L. I. Sedov, *Similarity and Dimensional Methods in Mechanics*. New York: Academic Press, 1959.
- [16] G. Taylor, «The formation of a blast wave by a very intense explosion I: theoretical discussion», *Proc R Soc Math Phys Eng Sci*, vol. 201, pp. 159-174, 1950.
- [17] G. Taylor, «The formation of a blast wave by a very intense explosion II, the atomic explosion of 1945», *Proc R Soc Math Phys Eng Sci*, vol. 201, pp. 175-186, 1950.
- [18] G. Reniers y V. Cozzani, «Domino Effects in the Process Industries Modeling, Prevention and Managing», 2013.
- [19] R. Bubbico y M. Marchini, «Assessment of an explosive LPG release accident: A case study», *J. Hazard. Mater.*, vol. 155, n.º 3, pp. 558-565, jul. 2008, doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.11.097.
- [20] D. Laboureur, F. Heymes, Lopebie, E., J. M. Buchlin, y P. Rambaud, «BLEVE Overpressure: Multiscale Comparison of Blast Wave Modeling.», *Process Saf. Prog.*, vol. 33, n.º 3, pp. 274-284, 2014, doi: 10.1002/prs.
- [21] E. Planas, E. Pastor, J. Casal, y J. M. Bonilla, «Analysis of the boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE) of a liquefied natural gas road tanker: The Zarzalico accident.», *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 34, pp. 127-138, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.01.026>.
- [22] B. Hemmatian, J. Casal, y E. Planas, «A new procedure to estimate BLEVE overpressure», *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 111, pp. 320-325, oct. 2017, doi: 10.1016/j.psep.2017.07.016.
- [23] B. Hemmatian, E. Planas-Cuchi, y J. Casal, «Analysis of Methodologies and Uncertainties in the Prediction of BLEVE Blast.», *Chem. Eng. Trans.*, vol. 36, pp. 541-546, 2014, doi: 10.3303/CET1436091.
- [24] B. Hemmatian, J. Casal, E. Planas, B. Hemmatian, y D. Rashtchian, «Prediction of BLEVE mechanical energy by implementation of artificial neural network», *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 63, pp. 1-8, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.104021>.
- [25] R. A. Ogle, J. C. Ramirez, y S. A. Smyth, «Calculating the explosion energy of a boiling liquid expanding vapor explosion using exergy analysis», *Process Saf. Prog.*, vol. 31, n.º 1, pp. 51-54, 2012, doi: 10.1002/prs.10465.
- [26] B. Hemmatian, J. Casal, E. Planas, y D. Rashtchian, «BLEVE: The case of water and a historical survey», *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 57, pp. 231-238, ene. 2019, doi: 10.1016/j.jlp.2018.12.001.
- [27] TNO, *Methods for the Calculation of Physical Effects - due to releases of hazardous materials (liquids and gases)- «Yellow Book»: CPR 14E*, 3rd ed. The Hague: Committee for the Prevention of Disasters, 2005.
- [28] V. Cozzani, G. Gubinelli, y E. Salzano, «Escalation thresholds in the assessment of domino accidental events», *J. Hazard. Mater.*, vol. 129, pp. 1-21, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.08.012>.
- [29] D. M. Johnson, M. J. Pritchard, y M. J. Wickens, «Large scale experimental study of BLEVE. Contract report on CEC cofunded research project.», Contract report 15367, 1991.
- [30] S. Mannan, *Lees' Loss Prevention in the Process Industries - Hazard Identification, Assessment and Control*, 4th Ed., vol. 1, 3 vols. Oxford, UK: Elsevier, 2012.
- [31] N. Alileche, D. Olivier, L. Estel, y V. Cozzani, «Analysis of domino effect in the process industry using the event tree method.», *Saf Sci*, vol. 97, pp. 10-19, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.12.028>.
- [32] French ministerial decree, «Arrêté du 29 septembre 2005». J. Off. République Française. NOR: DEVP0540371A, 2005. [En línea]. Disponible en: <http://legifrance.gouv.fr/eli/arrrete/2005/9/29/DEVP0540371A/jo/texte>
- [33] N. Alileche, V. Cozzani, G. Reniers, y L. Estel, «Thresholds for domino effects and safety distances in the process industry: A review of approaches and regulations», *Reliab Eng Syst Saf*, vol. 143, pp. 74-84, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.04.007>.
- [34] E. Planas, J. Arnaldos, B. Silvetti, A. Vallée, y J. Casal, «A Risk Severity Index for industrial plants and sites», *J. Hazard. Mater.*, vol. 130, n.º 3, pp. 242-250, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.07.015>.
- [35] I. Sellami, R. Nait-Said, K. Chetehouna, C. de Izarra, y F. Zidani, «Quantitative consequence analysis using Sedov-Taylor blast wave model. Part II: Case study in an Algerian gas industry», *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 116, pp. 771-779, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.02.003>.
- [36] Z. Török, N. Ajtai, A. T. Turcu, y A. Ozunu, «Comparative consequence analysis of the BLEVE phenomena in the context on Land Use Planning; Case study: The Feyzin accident», *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 89, pp. 1-7, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2010.08.003>.
- [37] V. Cozzani y E. Salzano, «The quantitative assessment of domino effects caused by overpressure. Part I: Probit models.», *J. Hazard. Mater.*, vol. 107, pp. 67-80, 2004, doi: 10.1016/j.jhazmat.2003.09.013.
- [38] OGP, «Vulnerability of plant/structure». Report No. 434-14.1, 2010.
- [39] J. Devore, *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences.*, 8th Edition. Boston, USA: Brooks/Cole Cengage Learning, 2012.
- [40] T. O. Kvålseth, «Cautionary Note about R2», *Am. Stat.*, vol. 39, n.º 4, pp. 279-285, 1985, doi: 10.1080/00031305.1985.10479448.
- [41] A. Drud, «CONOPT - A Large- Scale GRG Code», *ORSA J. Comput.*, vol. 6, n.º 2, pp. 207-216, 1994, doi: <https://doi.org/10.1287/ijoc.6.2.207>.
- [42] B. Hemmatian, «Contribution to the study of Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions and their mechanical effects.», Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España, 2016.
- [43] B. Hemmatian, J. Casal, y E. Planas, «Essential Points in the Emergency Management in Transport Accidents which Can Lead to a BLEVE-Fireball.», *Chem. Eng. Trans.*, vol. 57, pp. 439-444, 2017, doi: 10.3303/CET1757074.