

# Metodología para la obtención de modelos reducidos empleados en la estimación de distancias seguras ante eventos accidentales potencialmente catastróficos.

Methodology for obtaining reduced models used in estimating safety distances against potentially catastrophic accidental events.

Presentación: 6-7/10/2020

Doctorando:

**Romina Kraft**

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

Director/a:

**Nicolás Scenna**

Co-director/a:

**Patricia Mores**

## Resumen

Un problema ingenieril resiliente es la gran cantidad de accidentes tecnológicos asociados a la manipulación de sustancias peligrosas que se encuentran en el inventario de la mayoría de las industrias. Estos accidentes, de acuerdo a su nivel de gravedad, han ocasionado una gran cantidad de muertos y heridos como así también cuantiosas pérdidas económicas. En los últimos años, la propuesta de una metodología cuya aplicación contribuya a la mitigación de los daños causados ha adquirido gran importancia. En este trabajo, se plantea una metodología para obtener modelos simples que estimen distancias seguras entre los posibles receptores y la fuente de peligro, tomando como referencia modelos rigurosos que describan la fenomenología del evento. Esto garantiza que los modelos reducidos capten la naturaleza del evento, de la manera más simple asegurando a su vez una cierta precisión.

**Palabras clave:** accidentes tecnológicos, distancias seguras, modelos reducidos

## Abstract

A resilient engineering problem is the great number of technological accidents associated with the handling of hazardous substances found in the inventory of most industries. These accidents, according to their level of severity, have caused a large number of deaths and injuries as well as economic loss. In the last years, the development of a methodology whose application contributes to the mitigation of its effects has become important. In this work, a methodology is proposed to obtain reduced models that estimate safety distances between the possible receptors and the dangerous source, taking as reference rigorous models

that describe the phenomenology of the event considered. This ensures that the reduced models capture the nature of the event, in the simplest way while warranting a certain precision.

**Keywords:** technological accidents, safety distances, reduced models

## Introducción

El gran desarrollo de la actividad industrial, el surgimiento de nuevos procesos/productos y la ampliación de la producción para satisfacer el incesante crecimiento de la demanda por la constante evolución de la población mundial, guarda relación con el riesgo de ocurrencia de eventos accidentales catastróficos, debido en gran medida al almacenamiento, manipulación y deposición de sustancias peligrosas (inflamables/ explosivas y/o tóxicas). Ejemplos de tales eventos ocurridos en las últimas décadas, demuestran los daños inconmensurables que causan, la gran cantidad de muertos y heridos que dejan a su paso como así también las enormes pérdidas económicas, citándose entre los más graves los acontecidos en las ciudades de Bhopal (1984), México (1984), Alma Ata (1989), Chiba (2011), Chenjiang (2019) y el más reciente ocurrido el pasado 4 de agosto en Beirut (Abbasi y Abbasi, 2007; Reniers y Cozzani, 2013; Xinrui et al., 2015).

Frente a esta problemática, se hace imperante la búsqueda de metodologías eficaces con el fin de reducir la frecuencia de ocurrencia de dichos eventos y minimizar los daños ocasionados a un mínimo costo, garantizando el desarrollo sostenible en toda actividad industrial. Para ello es importante acudir al Análisis de Riesgos Cuantitativos (QRA), considerando la Filosofía de Diseño Inherentemente Seguro.

Es conocido que existen en la literatura especializada para distintos tipos de eventos (explosiones, incendios, dispersión de tóxicos), diversos modelos con diferentes grados de complejidad; considerando tanto el “costo” de la implementación y ejecución (engorrosos cálculos, enormes tiempos de cómputo, dificultad de programación, entre otros), como la necesidad de disponer de una gran cantidad de datos (generalmente difíciles de obtener *a priori* en las primeras etapas de diseño). Esto ocasiona que el análisis de riesgos generalmente pueda efectuarse cuando la ingeniería de detalle ha sido realizada, y las decisiones más importantes han sido tomadas. Sin embargo, para optimizar los costos es necesario analizar el riesgo subyacente en todas las etapas de un proyecto de diseño, dado que revertir las decisiones tomadas una vez efectuada la ingeniería de detalle resulta muy costoso. La importancia del diseño inherentemente seguro y la ausencia de una metodología adecuada para implementarlo han sido remarcadas por varios autores Amyotte et al. (2009), Etowa et al. (2003), Gupta y Edwards (2003, 2002), Latifi et al. (2017), Shariff y Zaini (2010).

La falta de modelos de implementación sencilla y, a su vez, eficaces a la hora de contemplar las relaciones subyacentes entre las variables operativas/de diseño más importantes y las que son inherentes al evento accidental catastrófico, es uno de los inconvenientes más destacados. Hasta el momento, autores que implementaron el diseño basado en riesgos han debido recurrir a preprocesamientos engorrosos para la estimación de distancias seguras, lo cual representa una importante limitación a cualquier intento de formalizar metodologías rigurosas, en particular basadas en programación matemática (Lira-Flores et al., 2016; López-Molina et al., 2013; Rusli y Shariff, 2010; Shariff y Leong, 2009).

Contar con modelos eficaces y sencillos, denotados aquí como Modelos Reducidos ( $MR_{ed}$ ) es una contribución indispensable para elaborar una metodología efectiva de diseño basado en riesgo o diseño inherentemente seguro, para la agilización de las evaluaciones de distintas alternativas/decisiones durante las sucesivas etapas (desde el diseño conceptual hasta el layout), permitiendo que las mismas se realicen en forma minuciosa y detallada, algorítmicamente, utilizando expresiones matemáticas simples que estimen distancias de seguridad ante eventos accidentales (desde incipientes hasta catastróficos). Es decir, determinar mediante el empleo de expresiones simples la distancia de separación que debe existir entre una posible fuente de peligro, con un cierto riesgo asociado, y el receptor de interés (persona/equipo/estructura).

El objetivo de este trabajo es, por tanto, plantear una metodología para hallar modelos que de manera simple estimen distancias seguras. Los mismos deben cumplir con los siguientes requisitos: *simplicidad*, de manera de no incorporar no linealidades y complejidades a problemas de optimización, *sobreestimación adecuada*, en el sentido de un error acotado, en función de las variables relevantes de diseño de cada equipo/ unidad de proceso y *generalidad*, tanto como para abarcar diferentes condiciones

de ocurrencia de eventos peligrosos (rango de valores para las variables involucradas) como para contemplar las habituales sustancias empleadas en la industria que puedan resultar involucradas.

## Desarrollo

Hasta el momento, no existe una metodología para obtener modelos simples que profundice en el análisis del evento accidental, esto es contemplando simultáneamente lo que sucede dentro del recipiente (fenómeno físico o fisicoquímico que transita la sustancia), en el recipiente (modificaciones/alteraciones ocasionadas sobre las propiedades mecánicas del mismo) y fuera del recipiente (sometimiento a condiciones ambientales adversas y/o anómalas, análisis de efecto dominó - influencia de accidentes cercanos). Aquí se propone efectuar un análisis integrador para seleccionar aquellas variables que tengan influencia en la ocurrencia del suceso y que sean las indicadas, es decir, que se puedan plantear relaciones funcionales simples para la estimación de distancias seguras y a su vez cumplir con el requisito de accesibilidad desde la etapa de concepción del proyecto.

La obtención de los Modelos Reducidos ( $MR_{ed}$ ), está conformada por tres etapas importantes: **Etapla preliminar** – *Estudio del fenómeno y sus características operativas y/o físicas/fisicoquímicas* – *Adopción de un modelo riguroso como Modelo de Referencia  $MR_f$* ; **Etapla de Análisis**- *Selección de las variables operativas/de diseño adecuadas y análisis de su influencia sobre las distancias seguras calculadas mediante el Modelo de Referencia  $MR_f$*  y **Etapla de Optimización** – *Propuesta de una correlación eficaz compuesta por relaciones funcionales simples con parámetros a determinar por comparación con el  $MR_f$  - Definición del problema de optimización.*

1. **Etapla Preliminar:** *Estudio del fenómeno y sus características operativas y/o físico/fisicoquímicas* – *Adopción de un modelo riguroso como Modelo Referencia  $MR_f$ .*

a) Definición del objeto en estudio (fuente de riesgo potencial de accidente tecnológico).

Teniendo en cuenta reportes de datos de accidentes históricos, se consideran distintos tipos de recipientes: tanques de almacenamiento, columnas de destilación, intercambiadores de calor, reactores químicos, tanques flash, separadores, como así también la estructura mecánica de vagones y camiones cisternas (Hemmatian et al., 2014; Reniers y Cozzani, 2013).

b) Análisis de las posibles causas del accidente (estudio causa y efecto).

Focalizándose en el objeto de estudio, se deben identificar aquellas propiedades mecánicas definidas durante el diseño de un equipo que son alteradas antes y durante la ocurrencia del evento accidental. Si bien existen fallas inherentes al recipiente como el debilitamiento por corrosión, mayoritariamente las fallas como rotura/fractura están altamente influenciadas por lo que sucede fuera del recipiente. Efectuando este análisis, denominado comúnmente como “Fault Tree Analysis” (FT), se puede conformar un marco de referencia para identificar diferentes causas desencadenantes del evento accidental. Al mismo tiempo que se contemplan estos aspectos, la sustancia contenida transita por cambios que se deben considerar: incremento de la temperatura, aumento de la presión interna, ascenso del nivel de líquido, entre otras.

c) Selección de modelos de referencia ( $MR_f$ ).

De los modelos matemáticos reportados en la bibliografía, se seleccionan como referencia aquellos que representen cada fenómeno de la manera más realista posible y cuyos resultados nunca subestimen las consecuencias del evento.

d) Análisis de vulnerabilidad.

De acuerdo al tipo de receptor e intensidad de daño considerada (muerte, daños estructurales leves/importantes/graves, daño mínimo/grave/colapso de equipo), la vulnerabilidad del receptor se cuantifica en función del tipo de evento: explosiones, incendios o dispersión de tóxicos en el aire en valores de sobrepresión, flujo de radiación térmica o concentración en el ambiente, respectivamente. Existen diversas formas de abordar dicho análisis: emplear el método PROBIT (PROBability unIT) (Finney,

1971) (Cozzani y Salzano, 2004a, 2004b), recurrir a datos de accidentes históricos (Cozzani y Salzano, 2004c) o contemplar los valores umbrales establecidos por diversas normativas (por ejemplo: Decreto Ministerial Francés, 2005). En esta metodología, se propone analizar los tres criterios y seleccionar los valores de vulnerabilidad más empleados en la bibliografía.

**2. Etapa de Análisis:** *Selección de las variables operativas/de diseño adecuadas y análisis de su influencia sobre las distancias seguras calculadas mediante el Modelo de Referencia MR<sub>f</sub>.*

Del proceso anterior, se seleccionan un número limitado de variables operativas/de diseño  $x_{i,j,k}$  que cumplan con los requisitos anteriormente nombrados (simple acceso desde las primeras etapas de concepción del proyecto, representativas de las características del evento, la fuente y el receptor). El subíndice  $i$  representa la identidad de la variable  $x$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), la cual se discretiza en un rango de interés ( $x_{i \min} \leq x_{i,j,k} \leq x_{i \max}$ ), siendo  $j$  un intervalo en particular ( $j = 1, 2, \dots, m$ ). Por otro lado, el subíndice  $k$  indica cada una de las etapas del evento:  $\alpha$  condiciones de almacenamiento,  $\beta$  justo antes de que ocurra el evento (explosión, incendio, fuga) y  $\gamma$  condición final. Para un menor manejo de datos, lo que se busca es reducir el número de variables seleccionadas de manera tal que cada una de las etapas ( $k$ ) quede representada, como máximo, por dos variables operativas/de diseño, es decir  $n \leq 6$ .

Estas variables se deben parametrizar dentro del rango real de aplicación, de acuerdo a los valores reportados en casos de estudios hipotéticos y realistas o de datos de accidentes históricos para ingresarlas como parámetros en el MR<sub>f</sub> seleccionado, de tal manera de lograr la nulidad de los grados de libertad, implementando dicho modelo en el software GAMS (General Algebraic Modeling System) en modo simulación, esto es con una función objetivo muda.

Mediante un análisis gráfico de los resultados arrojados por el MR<sub>f</sub> representados simbólicamente como  $R_{MR_f t}$ , con  $t = 1, 2, \dots, T$  siendo  $T$  el número total de posibles escenarios evaluados, se podrá inferir la influencia de las variables seleccionadas en la estimación de distancias seguras y si dicha selección es la correcta.

**3. Etapa de Optimización:** *Propuesta de una correlación eficaz compuesta por relaciones funcionales simples con parámetros a determinar por comparación con el MR<sub>f</sub> - Definición del problema de optimización.*

De acuerdo al análisis previo, se puede plantear el modelo reducido buscado que responde, en forma genérica, a una restricción de igualdad del tipo:

$$R_{MRed_t} = \sum_{q=1}^Q a_q \cdot f_q(x_{i,j,k}) + F_s \quad q=1,2,\dots,Q \quad (1)$$

$$\text{Con } F_s = b \cdot PR_{s,l} \quad (2)$$

siendo  $R_{MRed_t}$  el resultado que arroja el MR<sub>ed</sub> es decir la distancia segura de acuerdo al tipo de escenario evaluado ( $t$ ),  $a_1, a_2, \dots, a_q$  y  $b$  las variables de optimización (parámetros a determinar) y  $f_1, f_2, \dots, f_Q, F_s$  representan las distintas funciones propuestas para conformar el MR<sub>ed</sub>. En particular,  $F_s$  incluye propiedades características de las sustancias y su definición se justifica a partir de la búsqueda de una correlación general, que contemple el comportamiento de todas las sustancias típicas que puedan estar involucradas en cada evento en particular.

A su vez, la influencia de la naturaleza de la sustancia debe ser incorporada de la manera más simple posible, esto es, considerando un número reducido de propiedades físicas/termodinámicas de simple acceso identificadas como  $PR_{s,l}$ , donde el subíndice  $s$  identifica a la sustancia, con  $s = 1, 2, \dots, S$  y  $l$  indica la propiedad, con  $l \leq 3$ . Esto marca una amplia diferencia con los modelos de referencia, dado que los mismos demandan una gran cantidad de datos, entre ellos propiedades termodinámicas ( $PR_{s,l'}$ ) como entalpía, entropía y/o energía interna expresadas mayoritariamente en las tres condiciones  $k$ , para todos los escenarios evaluados  $T$  y otras propiedades físicas/fisicoquímicas. En este caso, de acuerdo a lo resaltado anteriormente con respecto a la gran demanda de datos que caracteriza a estos modelos,  $l' = 1, 2, \dots, L'$  representa un número elevado de parámetros.

Finalmente se conforma el problema de optimización, que se define en forma genérica de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } f(\mathbf{x}) \\
 & \text{s.t. } h_u(\mathbf{x}) = 0 \quad \forall u \\
 & \quad g_v(\mathbf{x}) \leq 0 \quad \forall v \\
 & \text{con } \mathbf{x} \in \mathbb{R}
 \end{aligned}$$

siendo  $f(\mathbf{x})$ ,  $h(\mathbf{x})$  y  $g(\mathbf{x})$  la función objetivo a minimizar, el conjunto de restricciones de igualdad y el conjunto de restricciones de desigualdad, respectivamente.

La función objetivo se corresponde con medidas o métricas que representen la bondad del ajuste para la determinación de los parámetros introducidos en los modelos reducidos  $MR_{ed}$ . Si bien se pueden explorar diversas alternativas, la raíz cuadrada de la sumatoria de los cuadrados de los errores relativos (RMSRE) entre los valores calculados mediante el modelo reducido y el de referencia, será el procedimiento estándar.

$$f(\mathbf{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T \varepsilon_t^2}{T}} \quad (3)$$

donde  $\varepsilon$  es el error relativo entre los valores calculados mediante el  $MR_{ed}$  ( $R_{MR_{ed}t}$ ) y el  $MR_f$  ( $R_{MR_ft}$ ).

$h_u(\mathbf{x})$  representa las restricciones de igualdad que conforman el  $MR_f$  junto con las ecuaciones 1 y 2 que conforman el  $MR_{ed}$ .

Por último, las expresiones de desigualdad,  $g_v(\mathbf{x})$ , refieren a restricciones funcionales y tecnológicas, ligadas a los rangos que toma cada variable, acotados a regiones de operación de interés práctico; como así también a la naturaleza del evento y una restricción fundamental que impone un error relativo positivo (sobreestimación). Además, se define un límite a dicha sobreestimación, de manera que el error no supere, en un cierto valor especificado, los resultados de los modelos  $MR_f$  en el rango de validez del modelo reducido.

El problema de optimización se implementará en GAMS, y de acuerdo a las características del  $MR_f$  fuertemente no lineal y no convexo, la función objetivo se minimizará empleando un resolvidor específico de la programación no lineal.

A continuación, en la Fig. 1 se presenta esquemáticamente la metodología propuesta.

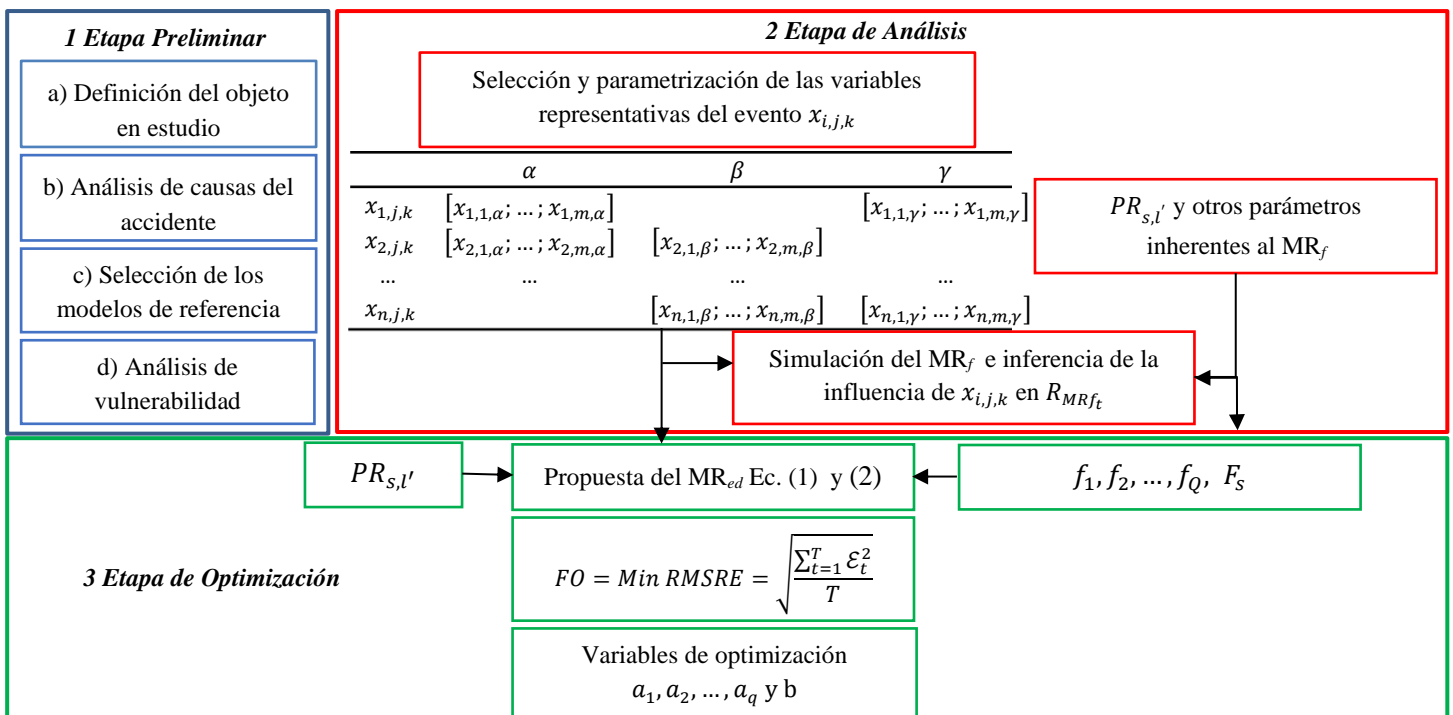


Figura 1. Esquema de la metodología propuesta para la obtención de  $MR_{ed}$  que estimen distancias seguras.

## Conclusiones

De acuerdo a la orientación de la metodología los modelos reducidos pueden incorporarse en problemas de optimización para el diseño de layout de plantas industriales, considerando el diseño basado en riesgo, y/o emplearse para perfilar además el diseño de cada equipo de la planta dependiendo de la elección de las variables operativas/de diseño y su parametrización. A su vez, mediante la inclusión de diversas restricciones de desigualdad, pueden considerarse requerimientos para el planeamiento urbano, el gerenciamiento de emergencias y/o la prevención de efectos dominó, entre otros aspectos cruciales, siendo de gran utilidad en el Análisis de Riesgos Cuantitativos (QRA).

## Referencias

- Abbasi, T., Abbasi, S.A. (2007). The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE): Mechanism, consequence assessment, management. *J. Hazard. Mater.* 141, 489–519. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.09.056>
- Amyotte, P.R., Pegg, M.J., Khan, F.I. (2009). Application of inherent safety principles to dust explosion prevention and mitigation 87, 35–39.
- Cozzani, V., Salzano, E. (2004a). The quantitative assessment of domino effects caused by overpressure. Part I: probit models. *J. Hazard. Mater.* 107, 67–80.
- Cozzani, V., Salzano, E. (2004b). The quantitative assessment of domino effects caused by overpressure. Part II: Case studies. *J. Hazard. Mater.* 107, 81–94.
- Cozzani, V., Salzano, E. (2004c). Threshold values for domino effects caused by blast wave interaction with process equipment. *J. Loss Prev. Process Ind.* 17, 437–447.
- Etowa, C.B., Amyotte, P.R., Pegg, M.J., Khan, F.I. (2003). Quantification of inherent safety aspects of the Dow Indices. *J. Loss Prev. Process Ind.* 16, 235–241.
- Finney, D.L. (1971). *PROBIT analysis*. Cambridge University Press, Londres.
- Gupta, J.P., Edwards, D.W. (2003). A simple graphical method for measuring inherent safety. *J. Hazard. Mater.* 104, 15–30.
- Gupta, J.P., Edwards, D.W. (2002). Inherently Safer Design - Present and Future. *Process Saf. Environ. Prot.* 80, 115–125.
- Hemmatian, B., Abdolhamidzadeh, B., Darbra, R.M., Casal, J. (2014). The significance of domino effect in chemical accidents. *J. Loss Prev. Process Ind.* 29, 30–38.
- Latifi, S.E., Mohammadi, E., Khakzad, N. (2017). Process plant layout optimization with uncertainty and considering risk. *Comput. Chem. Eng.* 106, 224–242.
- Lira-Flores, J., López - Molina, A., Gutiérrez- Antonio, C., Vázquez - Román, R. (2016). Reducción de la probabilidad de efecto dominó en tanques de almacenamiento a través de un enfoque de asignación, in: *Memorias Del XXXVII Encuentro Nacional de La AMIDIQ*. Presented at the AMIDIQ-2016, Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química, Puerto Vallarta, México, pp. 148–153.
- López-Molina, A., Vázquez - Román, R., Mannan, M.S., Félix- Flores, M.G. (2013). An approach for domino effect reduction based on optimal layouts. *J. Loss Prev. Process Ind.* 26, 887–894.
- Reniers, G., Cozzani, V. (2013). *Domino Effects in the Process Industries Modeling, Prevention and Managing*.
- Rusli, R., Shariff, A.M. (2010). Quantitative assessment for inherently safer design (QAISD) at preliminary design stage. *J. Loss Prev. Process Ind.* 23, 157–165.
- Shariff, A.M., Leong, C.T. (2009). Inherent risk assesment - A new concept to evaluate risk in peliminary design stage. *Process Saf. Environ. Prot.* 87.
- Shariff, A.M., Zaini, D. (2010). Toxic release consequence analysis tool (TORCAT) for inherently safer design plant. *J. Hazard. Mater.* 182, 394–402.
- Xinrui, L., Hiroshi, K., M. Sam, M. (2015). Case study: Assessment on large scale LPG BLEVEs in the 2011 Tohoku earthquakes. *J. Loss Prev. Process Ind.* 35, 257–266.