

CUANTIFICACIÓN DE RIESGOS POR EFECTO DOMINÓ DE ACCIDENTES EN LA INDUSTRIA PETROLERA

Ing. Julio Ariel Dueñas Santana¹, Dr. C. Jesús Luis Orozco², MSc. Santiago Díaz Suárez³, Dainelys Febles Lantigua⁴, Liudmila González Caballero⁵, Eliadni Costa Romero⁶, Karla Roldán Casanova⁷

1. Universidad de Matanzas – Sede “Camilo Cienfuegos”, Vía Blanca Km.3, Matanzas, Cuba. julio.ariel@umcc.cu

2,3,4,5,6,7. Universidad de Matanzas – Sede “Camilo Cienfuegos”, Vía Blanca Km.3, Matanzas, Cuba.

Resumen

El objetivo de este trabajo es explicar las metodologías de cuantificación de riesgos por efecto dominó de accidentes en la industria petrolera. El análisis cuantitativo de riesgo (QRA) representa un tema importante para profesionales de seguridad y se emplea en diversas áreas con el objetivo de implementar la seguridad tanto en el diseño como en la operación de procesos. El carácter continuado de accidentes es un hecho, que no se puede pasar por alto en los planes de prevención. Existen metodologías que permiten calcular el valor de probabilidad de escalado y que, además, han sido empleadas en estos últimos años por varios investigadores, validando su efectividad.

Palabras claves: Efecto dominó; Accidentes; Riesgo; Seguridad industrial; QRA.

Introducción

El objetivo de este trabajo es explicar las metodologías de cuantificación de riesgos por efecto dominó de accidentes en la industria petrolera. En este trabajo se analizan las técnicas que existen actualmente para determinar la probabilidad de escalado de un accidente primario de incendio y/o explosión dentro de un área de la industria.

El análisis de riesgo se emplea en muchas áreas de aplicación, y en la literatura científica se han presentado numerosos modelos y aplicaciones específicas. El análisis cuantitativo de riesgo (QRA) representa un tema importante para profesionales de seguridad y se emplea en diversas áreas con el objetivo de implementar la seguridad tanto en el diseño como en la operación de procesos. (Goerlandt *et al.*, 2017).

Desarrollo

Según Necci, (2015) la ocurrencia de accidentes relacionados a la actividad industrial ha sido más frecuente que en años anteriores, mientras que, los pocos accidentes que ocurrieron y pueden ocurrir, poseen un mayor potencial para causar enormes pérdidas. Por esta razón, los llamados accidentes en cascada, los cuales conducen a escenarios de baja frecuencia y alto impacto son crecientes en el mundo actual. Durante estos eventos, una cadena de eventos resulta en un accidente industrial mayor con consecuencias terribles y bastante impredecibles.

Según HSE, (2016) el análisis cuantitativo de riesgos incluye, en los casos de seguridad, particularidades suficientes que demuestren que se han identificado todos los peligros con el potencial de causar un accidente mayor y para esto es indispensable el análisis de los accidentes provocados por efecto continuado.

Un alto grado de concentración de actividades industriales dentro de una planta química, genera la base para accidentes que tienen un impacto simultáneo sobre muchas unidades de la planta, que eventualmente resultan en víctimas, contaminación ambiental, además, de grandes pérdidas monetarias. Los eventos en cascada pueden ser el resultado de un ataque terrorista o del efecto dominó, un evento, en el cual, el escalado de un accidente primario se maneja por la propagación de un evento primario a unidades cercanas, causando un incremento total de la severidad del accidente. (Necci, 2015).

Existen diversos autores que han definido el concepto de efecto dominó para accidentes en instalaciones industriales como son: Khan y Abbasi, (1998), Delvosalle *et al.*, (1998), Cozzani *et al.*, (2006), Antonioni *et al.*, (2009) y Lees (2012). Estas definiciones se muestran en la tabla 1, y todas coinciden que en el efecto dominó la magnitud de las consecuencias del accidente secundario es mucho mayor que la del accidente primario.

Tabla 1: Definiciones de efecto dominó por distintos autores.

Autor	Definición del efecto dominó
Khan y Abbasi, (1998)	Una cadena de eventos o situaciones cuando una cantidad de fuego, explosión, proyectil o tóxica generada por un accidente en una sola unidad en una industria causa accidentes secundarios y de orden mayor en otras unidades.
Delvosalle <i>et al.</i> , (1998)	Una cascada de accidentes (efecto dominó) en las cuales las consecuencias de un accidente previo se incrementan para los siguientes, tanto espacialmente, como temporariamente, conllevando a un accidente mayor.
Cozzani <i>et al.</i> , (2006)	Secuencias accidentales que tienen al menos tres rasgos en común: (i) un escenario de accidente primario, el cual inicia la secuencia de accidente dominó; (ii) la propagación del evento primario, debido a un vector de escalado generado por los efectos físicos del escenario primario, que resulta en el daño, como mínimo, de una parte del equipamiento secundario; y (iii) uno o más eventos secundarios (fuego, explosión, dispersión tóxica), consecuencia, el daño de partes de equipos (el número de eventos secundarios es usualmente el mismo de las partes dañadas de la planta).
Antonioni <i>et al.</i> , (2009)	La propagación de un evento de accidente primario unidades cercanas, causando su daño y eventos de accidentes secundarios, más fuertes, resultando un escenario global más severo que el evento primario que provocó la escala. Un accidente mayor en una llamada instalación secundaria, el cual es causado por fallas de una fuente de peligro externo.
Lees (2012)	Un factor a tener en cuenta del peligro que puede ocurrir si se escapa un material peligroso puede conllevar al escalado del incidente, un pequeño escape que trae fuego y daños por la incidencia de la llama en una tubería más larga o tanque con subsecuentes derrames de un largo inventario de materiales peligrosos.

El estudio de Abdolhamidzadeh *et al.*, (2011) analizó un conjunto de 224 accidentes dominó que ocurrieron entre 1910 y 2008 considerando el tipo de actividad, las sustancias involucradas, el nivel del efecto dominó y el impacto sobre la población afectada. El estudio evidencia que la mayoría de los accidentes dominó involucran sustancias inflamables. Los incendios han sido los accidentes más provocados en un 43% del récord de accidentes dominó. Entre los incendios, el charco de fuego fue el escenario específico más frecuente, resultando en un escalado (80% de accidentes dominó iniciados por incendios). Las explosiones fueron las iniciadoras de la cadena de accidentes en el 57% de los casos y las explosiones de nubes de vapor (VCEs) fueron el escenario específico más

frecuente, resultando en un escalado o intensificación (84%). El número de fatalidades por accidentes fue también analizado, y se obtuvo una tendencia al ascenso en el tiempo.

Un escenario de accidente primario usualmente se propaga debido a la falla de otra unidad de proceso. El vector de escalado es necesario en los accidentes de carácter continuado, que, no es más, que un vector de efectos físicos generados por el escenario de accidente primario, el cual causa su propagación. (Necci, 2015).

Según Cozzani *et al.*, (2013), el estudio de escenarios dominó requiere el análisis de la relación entre los efectos físicos del accidente primario y el daño potencial causado sobre las unidades cercanas y partes del equipamiento. Estas relaciones son usualmente referidas como modelos de vulnerabilidad.

El objetivo de los modelos vulnerabilidad es calcular una probabilidad de daño como una función de la intensidad de los efectos físicos y de las características constructivas. Muchos estudios emplean las ecuaciones Probit, pero otros aplican diferentes tipos de modelos de probabilidad de daños. (Cozzani *et al.*, 2013).

De acuerdo al efecto físico, el cual puede ser responsable del escalado son: onda expansiva, calor de radiación y proyección de fragmentos. (Kadri *et al.*, 2013).

En accidentes industriales las ondas expansivas, pueden generarse a partir de diferentes escenarios como son: rotura de tanques, explosiones de nube de vapor, BLEVE y explosiones de vapores condensados. Las consecuencias de las ondas expansivas sobre la estructura de equipamiento, depende de las características de la misma y de las instalaciones como: forma, tamaño, masa y resistencia dinámica. (Necci, 2015).

Junto a las ondas expansivas, en los procesos industriales, las explosiones pueden provocar, además, proyección de fragmentos. El impacto de fragmentos proyectados es una causa documentada del efecto dominó. La proyección de fragmentos, es usualmente provocada por explosiones internas, causando la falla de equipos, siendo parte de la energía de la explosión empleada para proyectar fragmentos. Los fragmentos pueden ser proyectados muy lejos del equipo colapsado, hasta más de 1 km, y los mismos poseen un potencial para inducir accidentes secundarios. Cuando los fragmentos golpean otro equipo, pueden agujerear la estructura (perforación), pueden detenerse (incrustación) o rebotar. Se considera que el daño siempre sucede luego del impacto, por lo que se asume que la probabilidad de daño es uno. (Necci, 2015).

Un enorme flujo de calor sobre equipos, puede producir diversos daños como son: una disminución de la resistencia mecánica de la pared de la estructura, un incremento de la presión interna, estrés térmico local, y una posible ignición de vapores inflamables. (Necci, 2015).

Según Gómez-Mares *et al.*, (2008) el análisis histórico de accidentes evidencia que los incendios estacionarios como los charcos de fuego son responsables de la gran mayoría de eventos de escalado en accidentes industriales.

El escalado es usualmente retardado con respecto al evento inicial, por ser el efecto térmico dependiente, en gran medida, del tiempo. El lapso de tiempo entre el inicio del accidente de incendio y la falla en el equipo dañado por el fuego se denomina tiempo de falla (ttf por sus siglas en inglés time to failure). El tiempo de falla es necesario determinarlo y existen en la literatura correlaciones para estimarlo. (Nima y Genserik, 2015)

El procedimiento para la identificación y evaluación de los escenarios dominó demanda un análisis detallado de las consecuencias del escenario primario y el daño estructural potencial causado por recipientes secundarios. Los modelos de vulnerabilidad de equipos son las herramientas más usadas para permitir la evaluación de probabilidad e intensidad de escenarios secundarios. (Necci, 2015).

El análisis específico requiere, para escenarios dominó, que se divida en dos etapas principales: la evaluación del vector de escalado generado por el escenario primario y la evaluación de los efectos de escalado posibles. Dos elementos claves en la evaluación del escenario dominó son: la evaluación de probabilidades de escalado y las consecuencias subsecuentes a la falla del recipiente secundario identificado. (Argenti *et al.*, 2014)

Un análisis detallado de todos los escenarios posibles dominó puede ser muy complicado. Por lo que, la evaluación dominó, debe ser llevada a cabo a diferentes niveles de detalle, dependiendo del contexto y del análisis. (Nomen *et al.*, 2014)

Según Nima y Genserik, (2015) la probabilidad de escalado se basa en los mecanismos estudiados por Khan y Abbasi, (1998), los cuales se muestran en la tabla 2. Además, existen parámetros importantes a considerar en el escalado de un accidente, los cuales se exponen también en esta tabla.

Tabla 2: *Vectores de escalado y parámetros críticos identificados en el estudio de Khan y Abbasi (1998b).*

Tipo de daño	Mecanismos posibles	Parámetros importantes
Daño térmico	Calor de radiación Convección	Factor de vista: gradiente de la llama, distancias, posición, orientación. Transmisividad del aire. Temperatura de la llama fugaz, velocidad y emisividad. Forma del recipiente. Puntos calientes.
Sobrepresión	Choque de la sobrepresión.	Sobrepresión absoluta. Diferencia de sobrepresión entre el

	Fuerza impulsora.	frente y la parte de atrás del objeto.
Misil	Impacto	Velocidad de fragmentos. Forma. Energía cinética. Capacidad de penetración. Dirección.

Fuente: Cozzani, (2007).

Efectos dominó son responsables de accidentes catastróficos severos que tienen lugar en la industria de procesos. En años recientes se han realizado estudios detallados sobre la definición, las metodologías para la evaluación de los efectos de escalado y sobre la integración de los procedimientos de evaluación de riesgo con correlaciones simplificadas. Los principales vectores de impacto asociados a los eventos dominó son la radiación y la sobrepresión, aunque el escalado debido a la proyección de fragmentos es también posible.

Una vez que el escenario primario inducido por la pérdida de control de cualquier proceso, la evaluación de posibles escenarios dominó comienza con la identificación de los posibles objetivos secundarios que pueden ser dañados por el evento primario. Esto es usualmente realizado por el uso de umbrales de daño (tabla 3). El uso de innecesarias aproximaciones conservativas para definir los umbrales para el escalado de accidentes puede provocar extremadamente altas distancias de seguridad, inaceptables desde el punto de vista económico.

Tabla 3: *Resumen de los criterios de escalados específicos obtenidos para los diferentes escenarios de accidentes primarios.*

Escenario	Vector de escalado	Modalidad	Categoría objetivo	Criterio de escalado
Flashfire	Calor de radiación	Incendio o fuego incidido	Todos menos tanques de techo flotante	Escalado improbable
			Tanques de techo flotante	Ignición de vapores inflamables
Fireball, bolas de fuego	Calor de radiación	Envuelto en llamas	Atmosférico	$I > 100 \text{ kW/m}^2$
			Presurizado	Escalado improbable
		Radiación estacionaria	Atmosférico	$I > 100 \text{ kW/m}^2$
			Presurizado	Escalado improbable
Jet-fire	Calor de radiación	Fuego incidido	Todos	Escalado siempre

				posible.
		Radiación estacionaria	Atmosférico	$I > 15 \text{ kW/m}^2$
			Presurizado	$I > 40 \text{ kW/m}^2$
Pool-fire	Calor de radiación	Envuelto en llamas	todos	Escalado siempre posible
		Radiación estacionaria	Atmosférico	$I > 15 \text{ kW/m}^2$
			Presurizado	$I > 40 \text{ kW/m}^2$
VCE	Sobrepresión	MEM $F \geq 6$; $M_f \geq 0.35$	Atmosférico	$P > 22 \text{ kPa}$
			Presurizado; alargado (tóxico)	$P > 16 \text{ kPa}$
			Alargado (inflamable)	$P > 31 \text{ kPa}$
	Calor de radiación	Fuego incidido.	Igual a flashfire	Igual a flashfire.
Explosión confinada	Sobrepresión	Interacción con onda expansiva	Atmosférico	$P > 22 \text{ kPa}$
			Presurizado; alargado (tóxico)	$P > 16 \text{ kPa}$
			Alargado (inflamable)	$P > 31 \text{ kPa}$
Explosión mecánica	Sobrepresión	Interacción con onda expansiva	Atmosférico	$P > 22 \text{ kPa}$
			Presurizado; alargado (tóxico)	$P > 16 \text{ kPa}$
			Alargado (inflamable)	$P > 31 \text{ kPa}$
		Fuego incidido	Todo	Igual flashfire
		Proyección de fragmentos	Todo	Impacto de fragmento
BLEVE	Sobrepresión	Interacción con la onda expansiva	Atmosférico	$P > 22 \text{ kPa}$
			Presurizado; alargado (tóxico)	$P > 16 \text{ kPa}$
			Alargado (inflamable)	$P > 31 \text{ kPa}$
		Proyección de fragmentos	Todos	Impacto de fragmentos
Explosión del punto de la fuente			Atmosférico	$P > 22 \text{ kPa}$
			Presurizado; alargado (tóxico)	$P > 16 \text{ kPa}$

			Alargado (inflamable)	P>31 kPa
--	--	--	--------------------------	----------

Cozzani *et al.*, (2007) exponen los valores umbrales y las ecuaciones para determinar la probabilidad de escalado en función de los mismos. Además, estas ecuaciones han sido empleadas por Kadri *et al.*, (2013); Kadri y Chatelet, (2014); Argenti *et al.*, (2014); Nomen *et al.*, (2014); Nima y Genserik, (2015); Wang *et al.*, (2015); Ebrahemzadith *et al.*, (2015).

Conclusiones

Existen metodologías que permiten calcular el valor de probabilidad de escalado y que, además, han sido empleadas en estos últimos años por varios investigadores, validando su efectividad. Se deben considerar los vectores de escalado para identificar los posibles accidentes secundarios y calcular la probabilidad de cada uno de forma individual. Hay que tener en cuenta para esto, parámetros importantes en función del tipo de daño y que la magnitud de las consecuencias de los accidentes secundarios, es mucho mayor que la de los accidentes primarios como es el caso de los charcos de fuego y los chorros de fuego.

Bibliografía

ABDOLHAMIDZADEH, T ABBASI, D. RASHTCHIAN, S.A. ABBASI. *Domino effect in process-industry accidents – An inventory of past events and identification of some patterns. Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Volume 24. No. 5. P 575-593. 2011.

ANTONIONI, G., SPADONI, G., COZZANI, V. *Application of domino effect quantitative risk assessment to an extended industrial area. Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 22. No 5. p 614-624. 2009.

ARGENTI, FRANCESCA; LANDUCCI, GABRIELE; ANTONIONI, GIACOMO; COZZANI, VALERIO. *Frequency evaluation for domino scenarios triggered by heat radiation exposure. Chemical Engineering Transactions*. [en línea]. Vol. 36. [citado 6 diciembre 2017]. Disponible en www.aidic.it/cet. DOI: 10.3303/CET1436063. 2014.

COZZANI V., ANTONIONI G., KHAKZAD N., KHAN F., TAVEAU J., RENIERS G. *Quantitative Assessment of Risk Caused by Domino Accidents. Domino Effects in the Process Industries, Modeling, Prevention and Managing*. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands. 2013.

COZZANI, V., GUBINELLI, G., & SALZANO, E. *Escalation thresholds in the assessment of domino accidental events. Journal of Hazardous Material*. Vol. 129(1-3), 1-21. 2006.

COZZANI, VALERIO; SALZANO, ERNESTO; CAMPEDEL, MICHELA; SABATINI, MARTINA; SPADONI, GIGLIOLA. *The assessment of major accident hazards caused by external events. IChemE Symposium Series*. No. 153. 2007.

DELVOSALLE, C., FIEVEZ, C., BROHEZ, S. *Domino effects phenomena: definition, overview and classification. European Seminar on Domino Effects*. Ed. Direction Chemical Risks. Federal Ministry of Employment. Bruselas. p 5-15. 1998.

GOERLANDT, FLORIS; KHAKZAD, NIMA; RENIERS, GENSERIK. *Validity and validation of safety related quantitative risk analysis: A review. Safety Science*. [en línea]. Volume 99. Pages 127-139. [citado 31 enero 2018]. Disponible en www.elsevier.com/locate/ssci. DOI: 10.1016/j.ssci.2016.08.023. 2017.

GÓMEZ-MARES, L. ZÁRATE, J. CASAL. *Jet fires and the domino effect. Fire Safety Journal*. Volumen 43.p 583–588. 2008.

HSE. *Prevention of fire and explosion, and emergency response on offshore installations*. Third edition. ISBN 978 0 7176 6326 2. 2016.

KADRI, FARID; CHATELET, E. *Domino effect analysis and assessment of industrial sites: A review of Methodologies and Software Tools. International Journal of Computers and Distributed Systems*. [en línea]. Vol. 2. P 1-10 [citado 7 marzo 2018]. Disponible en <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01026495> . HAL Id: hal-01026495. 2014.

KADRI, FARID; CHATELET, ERIC; LALLEMENT, PATRICK. *The assessment of risk caused by fire and explosion in chemical process industry: A domino effect based study. Journal of Risk Analysis and Crisis Response*. Vol. 3. No 2. P 66-76. 2013.

KHAN, F. ABBASI, S. *Models for domino effect analysis in the chemical process industries. Process Safety. Prog.* 17. p. 107–123. 1998.

LEES, F.P. *Loss prevention in the process industries: Hazard identification, assessment and control*, fourth edition. ED. Mannan S., Elsevier Butterworth-Heinemann. 2012.

NECCI, AMOS. *Cascading events triggering industrial accidents: Quantitative Assessment of NaTech and Domino Scenarios*. Bologna. 204 p. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Universidad de Bologna. 2015.

NIMA, KHAKZAD; GENSERIK, RENIERS. *Using graph theory to analyze the vulnerability of process plants in the context of cascading effects. Reliability engineering and system safety*. [en línea]. ISSN 0951-8320. P 63-73 [citado 1 febrero 2018]. Disponible en <http://hdl.handle.net/10067/1273350151162165141>. DOI: 10.1016/j.ress.2015.04.015. 2015.

NOMEN, ROSA; SEMPERE, JULIA; MARIOTTI, VALERIA. *QRA including domino effect as a tool for Engineering Design. Procedia Engineering*. [en línea]. Vol. 84. P 23-32 [citado 6 diciembre 2017]. Disponible en www.elsevier.com/locate/procedia. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.10.406. 2014.

RENIERS, GENSERIK; KHAKZAD, NIMA. *Revolutionizing safety and security in the chemical and process industry: applying the CHESS concept. Integrated Security Science*. [en línea]. Vol 2. No. 15. [citado 7 diciembre 2017]. ISSN: 2468-4546. DOI: 10.18757/jiss.2017.1.1547. 2017.

SALZANO, ERNESTO; ANTONIONI, GIACOMO; LANDUCCI, GABRIELE; COZZANI, VALERIO. *Domino effects related to explosions in the framework of land use planning. Chemical Engineering Transactions*. [en línea]. Vol.31. [citado 7 febrero 2018]. DOI: 10.3303/CET1331132. Disponible en: www.aidic.it/cet. 2013.

WANG, YAN; LI, YU; ZHANG, BIAO; YAN, PEI; ZHANG, LI. *Quantitative risk analysis of offshore fire and explosion based on the analysis of human and organizational factors. Mathematical Problems in Engineering*. [en línea]. Vol. 2015. [citado 31 enero 2018].

2018]. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1155/2015/537362>. DOI: 10.1155/2015/537362.
2015.



CD Monografías 2018
(c) 2018, Universidad de Matanzas
ISBN: 978-959-16-4235-6