

HERRAMIENTAS, METODOLOGÍAS O ÍNDICES QUE CUANTIFICAN LA PROBABILIDAD DEL EFECTO DOMINÓ EN LA INDUSTRIA PETROLERA

MSc. Julio Ariel Dueñas Santana¹, Ing. Yinet Caridad Boza Matos², Ing. Amelia González Miranda³

1. Universidad de Matanzas, julio.ariel@umcc.cu

2. Empresa de Perforación y Reparación Capital de Pozos (EMPERCAP)

3. Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro (EPEP-Centro)

Resumen

Uno de los fenómenos más devastadores que puede ocurrir en la industria de procesos es el denominado efecto dominó. Este se produce cuando los vectores de escalado radiación, sobrepresión o proyección de fragmentos son suficientes para hacer fallar otros equipos cercanos, agravando seriamente la magnitud de las consecuencias de los accidentes. Por lo que, se torna fundamental, analizar qué herramientas, metodología o índices existen en la bibliografía especializada para cuantificar la probabilidad del mismo dentro de la industria petrolera. Todas las metodologías detalladas han introducido contribuciones relevantes para analizar la determinación de la probabilidad del efecto dominó. Pero la mayoría presenta limitaciones para el estudio de estos escenarios. La mejor técnica para cuantificar la frecuencia de cadenas de eventos a partir de un accidente primario son las redes bayesianas, debido a que es la más adaptable y representativa y conduce a una mejor estimación de los escenarios de alta gravedad.

Palabras claves: Efecto dominó; redes Bayesianas; redes Petri; QRA; industria petrolera.

Introducción

Los accidentes industriales provocan daños considerables, no solo sobre las personas involucradas en los mismos, sino sobre el medio ambiente, la economía y la sociedad en general. Uno de los efectos que agravaría la magnitud de las consecuencias de los mismos está referido al carácter continuado debido a los escenarios de incendio y explosión, ya que son estos los más propensos a escalar. La industria petrolera ha sido relevante para el avance sostenido que la humanidad mantuvo en estos últimos años. Desafortunadamente de la mano de este progreso se acrecientan los registros de accidentes laborales y la posibilidad de provocar daños al ecosistema. Esto se debe principalmente a las características de los compuestos que se manejan, a las altas temperaturas y presiones que se trabajan, que pueden dar origen a incendios y explosiones y al poder corrosivo del compuesto que puede ser capaz de producir averías y, por consiguiente, derrames y escapes capaces de aportar incendios en todas sus manifestaciones (Domínguez, 2014). Históricamente la posibilidad de ocurrencia de los accidentes dominó ha sido controlada y reducida mediante el uso de medidas preventivas recomendadas en diferentes normas y estándares técnicos. De esta manera se definen las distancias de seguridad entre equipos, aislación térmica en áreas sensibles y dispositivos de emergencia. El objetivo de este trabajo es analizar las herramientas, metodologías o índices que permitan cuantificar la probabilidad del efecto dominó en la industria petrolera.

Desarrollo

Los accidentes comunes en las industrias químicas incluyen explosiones, incendios y emisiones tóxicas; sin embargo, las consecuencias más graves son producidas durante un efecto dominó, por lo que un análisis de riesgos es primordial (Kardell y Löf, 2014, Zarranejad y Ahmadi, 2016 y Jie et al., 2017).

Desde principios de la década de 1990, se han realizado esfuerzos para desarrollar métodos cualitativos para la evaluación de accidentes dominó (Reniers y Cozzani, 2013). Sin embargo, más recientemente se han hecho investigaciones relevantes llevadas a cabo para desarrollar herramientas y modelos que permitan que los escenarios dominó sean analizados cuantitativamente (Swuste et al., 2019).

1- Análisis cuantitativo de riesgo (QRA)

Un procedimiento típico es el análisis cuantitativo de riesgo (QRA, por sus siglas en inglés), herramienta ampliamente utilizada para la gestión de riesgo desde finales de 1970 que generalmente se realiza en plantas complejas o incluso en áreas industriales extendidas (Swuste et al., 2019).

El objetivo de una QRA es evaluar el riesgo asociado a cualquier unidad de proceso a través de estimaciones de frecuencia en un conjunto de consecuencia de posibles accidentes. El éxito de QRA en la práctica industrial se basa en el análisis detallado y la

cantidad de información utilizada sobre el proceso analizado. Se puede aplicar en casi cualquier etapa del proyecto, lo que lo convierte en una herramienta poderosa para estimar el riesgo de cualquier accidente probable (Kardell y Lööf, 2014).

Según Steijn et al., (2020) un QRA en general consta de cuatro etapas:

- ✓ Identificación de peligros: la identificación de factores y escenarios que puede representar un peligro relevante.
- ✓ Análisis de peligros: reconocimiento de los peligros que pueden surgir de un sistema o su entorno, documentando sus consecuencias no deseadas y analizando sus posibles causas.
- ✓ Análisis de consecuencias: creación de un modelo de la respuesta del sistema a una falla particular o peligro.
- ✓ Análisis de riesgos y resumen: análisis de árboles de fallas y eventos y resumen de todos los riesgos relacionados con todas las categorías de consecuencias.

Como describen Reniers y Cozzani (2013); valores umbrales, modelos de daños en el equipo y herramientas y procedimientos específicos para la evaluación de la frecuencia y las consecuencias de los escenarios generales de dominó deben considerarse como requisitos previos para el análisis cuantitativo de escenarios dominó.

Aunque las técnicas de QRA se han utilizado ampliamente para evaluación de riesgos, su aplicación a los efectos dominó ha sido limitada, ya que el análisis cuantitativo de los efectos dominó requiere grandes recursos computacionales (softwares) que hasta años recientes no han estado disponible (Reniers y Cozzani, 2013).

2- Árbol de fallos.

El análisis mediante árboles de fallos según señalan Casal et al., (2002) es una técnica que permite la cuantificación de la probabilidad o frecuencia con que puede producirse un suceso, es decir, permite el cálculo de la no fiabilidad o no disponibilidad del sistema. El primer paso para la elaboración de un árbol de fallos es un estudio previo del sistema o proceso que se quiere analizar con el fin de determinar los incidentes susceptibles de ser analizados y evaluados.

Una vez determinados los accidentes que se quieren analizar, deben establecerse los límites de la instalación. Seguidamente, es necesario identificar los fallos de los elementos y las relaciones lógicas que conducen al accidente. El proceso finaliza cuando todos los fallos identificados son primarios y no es posible determinar sus causas (Casal et al., 2002; Gullick et al., 2019).

Una vez que se construye el árbol de fallas, el análisis puede realizarse cualitativamente y cuantitativamente. El análisis cualitativo se utiliza para definir los conjuntos de corte mínimos de árbol de fallas: una colección de eventos básicos de modo que, si se elimina cualquier evento básico, el evento superior no ocurrirá y el análisis cuantitativo del árbol de fallas se realiza para obtener la probabilidad del evento superior (Vileiniskis y Remenyte, 2017).

La ventaja principal de esta técnica es su representación gráfica, que facilita la comprensión de la causalidad; de hecho, un árbol de fallos como tal es un modelo gráfico en forma de árbol invertido que ilustra la combinación lógica de fallos parciales que conducen al fallo del sistema (Casal et al., 2002).

La limitación principal de la metodología es que únicamente se pueden representar fallos “totales”, es decir, siempre se considera el fallo completo del elemento involucrado en la cadena de sucesos que conduce al accidente y representan fotografías instantáneas del proceso. Además, para su análisis y desarrollo se requiere de mucho tiempo y personal especializado con un conocimiento completo de la planta.

3- Árbol de sucesos o eventos.

Nolan, (2011) describe el árbol de sucesos como un modelo lógico que matemática y gráficamente retrata la combinación de eventos de fallo y circunstancias en una sucesión de incidentes.

Por otra parte, Wells, (2003) plantea que son usados para realizar análisis probabilístico y se organiza mediante una estructura de árbol en la que cada bifurcación se decide a partir de la ocurrencia de un fenómeno u otro, además de que son la mejor herramienta para el análisis de consecuencias. También establece los siguientes pasos para el análisis de árboles de sucesos:

- a) Identificar el evento iniciador que generalmente es un evento de fallo correspondiente al escape de un material peligroso.
- b) Identificar el desarrollo del incidente.
- c) Construir el árbol de eventos. Este es construido de izquierda a derecha, en cada nodo se muestran las alternativas analizadas.
- d) Clasificar los resultados del incidente.
- e) Estimar la posibilidad de ocurrencia de cada suceso.
- f) Clasificar los resultados y determinar su probabilidad.

Autores como Casal et al., (2002) y Wells, (2003) le atribuyen ventajas a esta técnica, muy similares a las de los árboles de fallos y entre sus limitaciones principales citan:

- ✓ La laboriosidad del trabajo si el árbol llegara a proyectarse muy extenso.
- ✓ La incertidumbre a la cual está asociado el valor obtenido por el hecho de estar atado a probabilidades.

Por otro lado, los árboles de eventos se utilizan ampliamente en las industrias de procesos para representar escenarios de incidentes. Son usados para mostrar las probabilidades de éxito y fracaso de las barreras protectoras y la progresión de un inicio evento a varios escenarios potenciales. También argumentaron que el árbol de eventos y la red bayesiana son complementarios y que ambos modelos pueden usarse juntos para tener una mejor comprensión de los posibles escenarios (Gullick et al., 2019).

4- Método Probit

El análisis Probit es un método bien conocido para evaluar la relación dosis-efecto para las respuestas humanas a sustancias tóxicas, radiación térmica y sobrepresión. Además, se considera un método estadístico útil para evaluar edades de los equipos sometidos a ondas de presión en el principal marco de análisis cuantitativo de riesgos (Cozzani y Salzano, 2004).

Domínguez, (2014) apunta que es un método muy destacado entre los modelos de vulnerabilidad, los cuales son basados en experiencias realizadas con animales de laboratorio o estudios de muertes y lesiones de accidentes ocurridos.

En este método se parte de una manifestación física de un incidente y nos da como resultado una previsión de los daños a las personas expuestas al incidente, es decir: número de heridos por diferentes lesiones y número de víctimas fatales.

El problema principal en la construcción de funciones Probit para los daños causados por sobrepresión consisten principalmente en identificar el significado físico de la variable independiente (la "dosis"), del "efecto" y de la consistencia de la "muestra representativa" utilizada para construir la función estadística. De hecho, el uso de métodos estadísticos implica que el análisis de los modelos no puede reproducir el comportamiento complejo de fenómenos, que a su vez pueden predecirse estadísticamente una vez que hay disponible una prueba de muestra suficientemente grande (Cozzani y Salzano, 2004).

5- Red Bayesiana

Con el objetivo de evaluar la frecuencia de los escenarios dominó se pueden aplicar las redes bayesianas, aprovechando su estructura gráfica flexible para mostrar el orden secuencial de los escenarios y las relaciones probabilísticas entre un gran número de

variables y hacer inferencia probabilística con esas variables (Leoni et al., 2019; Shi et al., 2019; Simon et al., 2019 y Zarei et al., 2019).

Según Steijn et al., (2020) las redes bayesianas se han convertido en una de las herramientas más completas, coherentes y auto sostenidas entre las usadas para la adquisición de conocimientos, representación y aplicación a través de sistemas computarizados.

Una red bayesiana es una estructura gráfica que permite representar y razonar sobre un dominio incierto. En esta los nodos representan las variables del sistema y los arcos simbolizan las dependencias o las relaciones causa-efecto entre las variables y la fuerza de la relación entre variables se cuantifica por distribuciones de probabilidad condicional asociadas con cada nodo. Los nodos desde los que se dirigen los arcos se denominan nodos principales, mientras que los nodos a los que se dirigen los arcos se denominan nodos secundarios. De hecho, un nodo puede ser simultáneamente el hijo de un nodo y el padre de otro nodo. Los nodos sin padre y los nodos sin hijo se denominan nodos raíz y nodos hoja, respectivamente (Reniers y Cozzani, 2013 y Yang et al., 2019).

Desde 2001, las redes bayesianas se han utilizado para analizar situaciones de riesgo. Particularmente, representa un formalismo útil en los análisis de riesgo dominó, debido a su capacidad de modelar datos probabilísticos con dependencias entre eventos (Dongiovanni y Lesmantas, 2016).

En un modelo de incendio, la red bayesiana puede usarse para modelar la probabilidad de fuga ya que proporciona un resultado de una interacción compleja de parámetros, mientras que la probabilidad de ignición depende del tiempo y proceso aleatorio, que es mejor modelado por redes Petri. Por lo tanto, la integración de estas dos técnicas proporciona un método robusto para capturar la relación causal entre variables y características dependientes del tiempo.

Una característica ventajosa de las redes bayesiana es su capacidad para incorporar datos sobre los eventos intermedios del árbol de fallas. En el análisis del árbol de fallas, la información probabilística sobre los eventos intermedios es completamente determinada por la información sobre los eventos básicos, mientras que en el análisis de las redes bayesianas uno es libre de incorporar información sobre cualquiera de los eventos intermedios (Dongiovanni y Lesmantas, 2016).

6- Red Petri

El concepto de red de Petri fue propuesto por Petri en 1996. Desde luego, estas redes se usan ampliamente para modelar y analizar eventos discretos, sistemas tales como comunicación, fabricación y transporte. Son herramientas de modelado matemático utilizadas para analizar y simular sistemas concurrentes. Es un método prometedor para describir y estudiar relaciones entre partes de un sistema que se caracteriza por ser actual,

asíncrono, distribuido, paralelo, no determinista y/o estocástico y se han aplicado al modelado y análisis de respuesta de emergencia (Zhou y Reniers, 2018).

El sistema es modelado como un gráfico dirigido con dos conjuntos de nodos: el conjunto de lugares que representan objetos del estado o del sistema y el conjunto de eventos o transiciones que determinan la dinámica del sistema (Zhou y Reniers, 2017 y Yang et al., 2019).

Las redes de Petri consisten en dos tipos de elementos, llamados lugares y transiciones (Mohammad et al., 2019). Los lugares representan estados o condiciones, mientras que las transiciones muestran los eventos. Arcos que conectan lugares y las transiciones son de lugares a transiciones (arcos de entrada) o transiciones posiciones a lugares (arcos de salida).

Conclusiones

Todas las metodologías detalladas anteriormente han introducido contribuciones relevantes para analizar la determinación de la probabilidad del efecto dominó. Pero la mayoría presenta limitaciones para el estudio de estos escenarios. La mejor técnica para cuantificar la frecuencia de cadenas de eventos a partir de un accidente primario de incendio y explosión las redes bayesianas, debido a que es la más adaptable y representativa y conduce a una mejor estimación de los escenarios de alta gravedad. Además, para tener una mejor comprensión de los posibles escenarios de incidentes se realizará la combinación de algunos métodos.

Referencias bibliográficas

CASAL, J.; MONTIEL, H.; PLANAS, E.; VÍLCHEZ, J. (2002). Análisis del riesgo en instalaciones industriales. 2da ed. Barcelona: Ediciones UPC. 362 p.

COZZANI, V.; SALZANO, E. (2004). The quantitative assessment of domino effects caused by overpressure Part I. Probit models. Journal of Hazardous Materials. [en línea] Elsevier. Disponible en: www.elsevier.com/locate/jhazmat.

DOMÍNGUEZ, J.R. (2014). Análisis Cuantitativo de Riesgos en el ámbito de la Protección Civil: aplicación a una instalación de almacenamiento de productos químicos. Trabajo Fin de Grado. Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales. Universidad de Sevilla. España.

DONGIOVANNI, D.N.; LESMANTAS, T. (2016). Failure rate modeling using fault tree analysis and Bayesian network: DEMO pulsed operation turbine study case. Fusion Engineering and Design. Disponible en <http://www.elsevier.com/locate/fusengdes>.

GULLICK, D.; BLACKBURN, G.A.; WHYATT, J.D.; VOPENKA, P.; MURRAY, J.; ABBATT, J. (2019). Tree risk evaluation environment for failure and limb loss (TREEFALL): An integrated model for quantifying the risk of tree failure from local to regional scales. [en línea]. Elsevier. [fecha de consulta: 13 enero 2020]. Disponible en: <https://www.elsevier.com/locate/ceus>.

JIE, L.; RENIERS, G.; COZZANI, V. y KHAN, F. (2017). A bibliometric analysis of peer-reviewed publications on domino effects in the process industry. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.JLP.2016.06.003>.

KARDELL, L. y LOOF, M. (2014). QRA with respect to domino effects and property damage. 92p. Division of Risk Management and Societal Safety Lund University, Sweden. Report 5461, Lund 2014.

LEONI, L.; TOROODY, A.B.; DE CARLO, F.; PALTRINIERI, N. (2019). Developing a risk-based maintenance model for a Natural Gas Regulating and Metering Station using Bayesian Network. [en línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.11.003>. Vol 57.

MOHAMMAD, Z.K.; MOHAMMAD, T.B.; KHAN, F.; AHMED, S. (2019). Dynamic domino effect risk assessment using Petri-nets. Process Safety and Environment Protection. Disponible en: www.elsevier.com/locate/psep.

NOLAN, D.P. (2011). Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for Oil, Gas, Chemical and Related Facilities. Second edition. Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier. The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford.

RENIERS, G. y COZZANI, V. (2013). Domino Effects in the Process Industries Modeling, *Prevention and Managing*. Elsevier. [fecha de consulta:18 enero 2020] 372 p.

SHI, J.; ZHU, Y.; KHAN, F.; CHEN, G. (2019). Application of Bayesian Regularization Artificial Neural Network in explosion risk analysis of fixed offshore platform. [en línea] [fecha de consulta: 15 enero 2020]. Disponible en: www.elsevier.com/locate/jlp. Vol. 57, p 131-141.

SIMON, C.; MECHRI, W.; CAPIZZI, G. (2019). Assessment of Safety Integrity Level by simulation of Dynamic Bayesian Networks considering test duration. Elsevier. [en línea] Disponible en: www.elsevier.com/locate/jlp. Vol. 57, p 101- 113.

STEJIN, W.M.P.; VAN KAMPENB, J.N.; BEEK, D.V.; GROENEWEG, J.; VAN GELDER, P.H.A.J.M. (2020). An integration of human factors into quantitative risk analysis using Bayesian Belief Networks towards developing a 'QRA+'. *Safety Science*. Elsevier [en línea] journal homepage. Disponible en www.elsevier.com/locate/safety.

SWUSTE, P.; ZWAARD, W.; GROENEWEG, J. y GULDENMUND, F. (2019). Safety professionals in the Netherlands. *Saf.Sci.* 114, pp-79–88.

VILEINISKIS, M.; REMENYTE, R. (2017). Quantitative risk prognostics framework based on Petri Net and Bow-Tie models. *Reliability Engineering and System Safety*. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2017.03.026>.

WELLS, G. (2003). Major Hazards and their management. Gulf Publishing Company. Houston, Texas. 315 p.

YANG, R.; KHAN, F.; MOHAMMED, T.B.; KONG, D. (2019). A time-dependent probabilistic model for fire accident analysis. *Fire Safety Journal*. Elsevier. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.102891>.

ZAREI, E.; KHAKZAD, N.; COZZANI, V.; RENIERS, G. (2019). Safety analysis of process systems using Fuzzy Bayesian Network (FBN). Elsevier. [en línea] Disponible en: www.elsevier.com/locate/jlp. Vol 57.

ZARRANEJAD, A. y AHMADI, O. (2016) Fire and explosion risk assessment in a chemical company by the application of DOW fire and explosion index. Elsevier. Disponible en: www.elsevier.com.

ZHOU, J.; RENIERS, G. (2017). Petri-net based cascading effect analysis of vapor cloud explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Elsevier journal homepage. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2017.04.017>.

ZHOU, J.; RENIERS, G. (2018). Petri-net based evaluation of emergency response actions for preventing domino effects triggered by fire. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. Disponible en: www.elsevier.com/locate/jlp.doi.org/10.1016/j.jlp.2017.12.001.