

USO DE LAS REDES BAYESIANAS Y PETRI EN LA CUANTIFICACIÓN DEL IMPACTO INDIVIDUAL DE ACCIDENTES EN LA INDUSTRIA DE PROCESOS

MSc. Julio Ariel Dueñas Santana¹, Ing. Amelia González Miranda², Dr.C. Jesús Luis Orozco¹

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

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

Resumen

El impacto global de accidentes en la industria de procesos se ha incrementado en los últimos años. Por esta razón, la cuantificación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes de incendio, explosión y tóxicos, se hace indispensable en la gestión de riesgos. Una de las herramientas más utilizadas son las redes Bayesianas y Petri en los últimos años. Por lo que el objetivo de esta investigación es evaluar el uso de este tipo de redes en la determinación del impacto individual de accidentes en la industria de procesos. Las redes bayesianas y Petri son ideales para la cuantificación de la frecuencia del efecto continuado de accidentes. La combinación de las técnicas Análisis de Riesgo Cuantitativo, ALOHA, funciones Probit y mapas de isorriesgos constituye la herramienta más útil para evaluar el impacto individual que provocan los accidentes tóxicos, de incendios y explosión por su efecto continuado.

Palabras claves: Red Bayesiana; Red Petri; efecto dominó; impacto humano; QRA

Introducción

La producción, manipulación y transporte de productos peligrosos por la industria química ha aumentado durante las últimas décadas. Esto ha provocado el incremento de la frecuencia con la que ocurren accidentes graves (Gómez, 2009), los que pueden tener a su vez consecuencias sobre las instalaciones, las personas y el entorno dada la posibilidad de que sus efectos puedan afectar áreas relativamente extensas (Villafañe, 2013). La industria del petróleo es una de las más grandes a nivel mundial, su importancia actualmente es indiscutible, esta se encarga de la exploración, extracción, refinación y comercialización del petróleo y sus derivados (Zhou et al., 2016).

La red bayesiana es un modelo de red probabilístico constituido por dos componentes principales: estructura gráfica y estructura de probabilidades, que se realiza a partir de la aplicación del teorema de Bayes. Muy útil para tratar las incertidumbres y la información de diferentes fuentes, con un amplio abanico de aplicaciones en los sectores industriales y gran popularidad en la evaluación de riesgos debido a su estructura gráfica flexible. (Kabir y Papadopoulos, 2019). Las redes Petri, por su parte, son un modelo matemático y gráfico, constituido por seis tuplas y definido por lugares de entrada y salida, capaz de analizar sistemas complejos. Permiten representar y estudiar un sistema cualitativamente, tanto como cuantitativa o dinámicamente. Son cada vez más utilizadas para la seguridad de sistemas, la confiabilidad y la evaluación de riesgos. (Baldan et al., 2015). Estas redes superan muchas limitaciones de los enfoques clásicos de análisis de seguridad y confiabilidad, de ahí que su empleo sea cada vez mayor, sobre todo en las industrias que operan con sustancias con un alto grado de peligrosidad. (Kabir y Papadopoulos, 2019). Por lo que el objetivo de esta investigación es evaluar el uso de este tipo de redes en la determinación del impacto individual de accidentes en la industria de procesos.

Desarrollo

Las redes bayesianas son representaciones gráficas de cantidades y decisiones inciertas que revelan explícitamente las dependencias probabilísticas entre las variables y los flujos de información relacionados. La ventaja más relevante de las redes bayesianas es que proporcionan una herramienta útil para tratar las incertidumbres y la información de diferentes fuentes. (Villa y Cozzani, 2016; Khakzad et al., 2018; Cui et al., 2019; Kabir y Papadopoulos, 2019).

Las redes bayesianas son un modelo estadístico multivariante formado por dos componentes: cuantitativo y cualitativo. Donde el componente cualitativo no es más que un gráfico acíclico dirigido compuesto por una serie de nodos conectados entre sí mediante relaciones direccionadas. Cada nodo representa una variable en el modelo, y los arcos entre nodos codifican las relaciones de dependencia /independencia entre las mismas. Por otra parte, el componente cuantitativo expresa las distribuciones de probabilidad condicionada para cada variable (X_i) dado sus padres ($pa(X_i)$) en el grafo, expresadas mediante tablas de probabilidad condicionada (TPC) en el caso de variables discretas, y funciones de densidad

para las continuas. (Ropero et al., 2014; Yazdi y Kabir, 2018; Yazdi, 2018; Kabir y Papadopoulos, 2019).

La ventaja que presentan las redes bayesianas, frente a otros modelos, es la facilidad con la que permiten plantear escenarios futuros sin tener que introducir información en todas las variables, independientemente de que sean discretas o continuas. (Ropero et al., 2014)

El modelo se realiza utilizando el teorema de Bayes que explica cómo actualizar una distribución de probabilidad de valores de un parámetro. Este teorema según Kabir y Papadopoulos (2019) plantea que si A y B son dos eventos aleatorios y se sabe que B ocurrió, entonces la probabilidad posterior de que ocurra el evento A dado que B ha ocurrido se puede determinar por la ecuación 1.

$$P(A/B) = P(A) \cdot \frac{P(B/A)}{P(B)} \quad (1)$$

Siendo P(A) y P(B) las probabilidades previas de los eventos A y B respectivamente.

Las redes bayesianas son una técnica alternativa para el análisis de confiabilidad de sistemas con un amplio potencial de aplicación debido a su capacidad para manejar la escasez de datos así como la incertidumbre de parámetros y dependencias condicionales y secuenciales. (Khakzad et al., 2018). En la tabla 1 se muestran diferentes aplicaciones de las redes bayesianas.

Tabla 1 Aplicaciones de las redes bayesianas en la industria de procesos

Autor y Año	Revista	Aplicación
Khakzad et al., (2013a)	Process Safety and Environmental Protection	Emplearon las redes bayesianas para la cuantificación del riesgo asociado con las operaciones de perforación en alta mar.
Khakzad et al., (2011)	Reliability Engineering and System Safety	Comparan las aplicaciones de los árboles de fallas y redes bayesianas en el análisis de riesgos de seguridad en las industrias de procesos.
Khakzad et al., (2013b)	Risk Analysis	Expusieron un nuevo enfoque basado en redes bayesianas para la estimación de probabilidad y la determinación del camino de propagación

		de fallas de efectos dominó.
Khakzad (2015)	Reliability Engineering and System Safety	Desarrolló una metodología bayesiana para modelar tanto espacial como temporalmente la evolución de los efectos en cascada de una cadena de accidentes y la secuencia más probable de accidentes en una planta de proceso.
Hu et al., (2015)	Process Safety and Environmental Protection	Mostraron un método dinámico basado en la red bayesiana para estudios de propagación de fallas en instalaciones de procesos petroquímicos
Wu et al., (2015)	Reliability Engineering and System Safety	Plantearon integrar el modelado estructural interpretativo (ISM) con redes bayesianas para la evaluación de riesgos para operaciones en ambientes marinos
Aljaroudi et al., (2015)	Journal of Loss Prevention in the Process Industry.	Utilizaron redes bayesianas para la evaluación de riesgos de los oleoductos y gasoductos
Li et al., (2016)	Process Safety and Environment Protection.	
Wu et al., (2017)	Journal of Loss Prevention in the Process Industry.	
Bhandari et al.,	Journal of Loss Prevention in the	Aplicaron las redes bayesianas para realizar una evaluación de riesgos de perforación a

(2015)	Process Industry.	presión gestionada en aguas profundas.
Chin et al., (2009)	Expert Systems with Applications	Formularon un método basado en redes bayesianas para la evaluación de riesgos en desarrollo de nuevos productos.
Li et al., (2010)	Risk Analysis	Propusieron construir modelos de redes bayesianas para la evaluación del riesgo de inundación utilizando el conocimiento del dominio y datos espaciales.
Brito y Griffiths (2016)	Reliability Engineering and System Safety	Presentaron un enfoque bayesiano para predecir el riesgo de perder vehículos submarinos autónomos (AUV) durante una misión en ambientes peligrosos debido a las desviaciones de las condiciones de operación.
Trucco et al., (2008)	Reliability Engineering y Sistem Safety	Expusieron un método para integrar factores humanos y organizacionales (HOF) en un análisis de riesgos por análisis de árbol de fallas y redes bayesianas.
Ale et al., (2014)	Safety Science	Emplean las redes bayesianas en la evaluación de riesgos y vulnerabilidades presentes y futuras a eventos catastróficos en la industria petrolera.
Villa y Cozzani (2016)	Chemical Engineering Transactions	Desarrollaron un modelo de red bayesiana para la cuantificación del desempeño de las barreras de seguridad.
Yuan et al., (2019)	Journal of Loss Prevention in the Process Industry.	Presentaron un nuevo método de análisis para los factores causales en procesos de emergencia de accidentes de incendio para el almacenamiento y transporte de petróleo y gas basados en el modelado de interpretación estructural (ISM) y modelo modificado de red

		bayesiana (MBN).
Lucas et al., (2017)	Atmospheric Chemistry and Physics	Desarrollaron una red bayesiana basada en conjuntos de sistema de modelado que puede determinar información sobre la liberación atmosférica de una central nuclear.
Huang,(2017)	Tesis en opción al grado científico de Doctor en Psicología Quantitative risk analysis for explosion safety of oil and gas facilities.	Creó un método de análisis de riesgo de explosión e incendios utilizando redes bayesianas cuando hay múltiples factores, consecuencias e interrelaciones complejas.

Hu et al., (2015) propusieron un método dinámico basado en la red bayesiana para estudios de propagación de fallas en instalaciones de procesos petroquímicos, apoyado en el desastre de Bhopal producto de una fuga de gas en la India. En este enfoque, en primer lugar, se realiza un estudio HAZOP para identificar las fallas, sus causas y posibles consecuencias. Las relaciones causales entre los diferentes eventos se modelan utilizando redes bayesianas dinámicas (DBN) para la evaluación de riesgos.

El objetivo del estudio de Bhandari et al., (2015) fue aplicar la red bayesiana para realizar un análisis dinámico de seguridad de aguas profundas a partir de la investigación de diferentes factores de riesgo asociados con las tecnologías operaciones de perforación a presión gestionada (MPD) y la perforación desbalanceada (UBD). El análisis se realiza para evaluar la contribución de cada causa raíz al posible accidente; para lo que convierte un diagrama de flujo de escape en una red bayesiana. Finalmente, los resultados muestran que UBD tiene una mayor probabilidad de ocurrencia de reventones y patadas en comparación con la tecnología MPD.

Huang, (2017) emplea una red bayesiana para modelar mecanismos complicados causados por efectos de dominó, debido a su capacidad para hacer frente a sistemas complejos. Se centra en la evaluación de riesgos de accidentes de explosión e incendio durante el proceso de reabastecimiento de combustible de un tanque a una estación de servicio. En su estudio tiene en cuenta tres tipos de datos: información práctica, simulaciones computacionales y juicios lógicos subjetivos, debido a la dificultad del modelado bayesiano de encontrar datos suficientes. El estudio de caso demostró que las redes bayesianas son capaces de lidiar con complicadas interrelaciones causadas por efectos de dominó. Además, consecuencias

adicionales o factores de riesgo, como preocupaciones ambientales, factores humanos y barreras de seguridad se pueden agregar fácilmente a la red debido a su flexibilidad.

Utilizando el método de modelado de interpretación estructural (ISM) Yuan et al., (2019) establecen los factores causales en los procesos de emergencia de accidentes de incendio para el almacenamiento y transporte de petróleo y gas, obteniendo factores que conducen a accidentes secundarios, para lo que se construye el modelo de árbol de fallas de accidentes secundarios, y la importancia de la probabilidad de cada factor de causa se calcula utilizando el método de análisis del árbol de fallas. El modelo se transforma en una red bayesiana donde las tablas de probabilidad condicional se modifican utilizando el método de puntuación experto y se establece finalmente el modelo MBN.

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 (Wang et al., 2018b; Zarei et al., 2018; Leoni et al., 2019; Simon et al., 2019; Shi et al., 2019). El empleo de estas redes conduce a un cálculo más preciso de las probabilidades de escalado que es crucial para la evaluación de riesgos y el manejo de los efectos dominó y además, permite tener en cuenta las interacciones entre las unidades lo que brinda la secuencia de eventos más probable durante un escenario de este tipo (Khakzad et al., 2018).

Las redes de Petri son una herramienta introducida en la informática para modelar sistemas discretos concurrentes. (Baldan et al., 2015). Son modelos gráficos y matemáticos formales, herramienta adecuada para especificar y analizar el comportamiento de sistemas complejos. (Kabir y Papadopoulos, 2019).

Las redes Petri son un bipartito gráfico dirigido generalmente representado por seis tuplas: $N = (P, T, A, k, W, M_0)$ donde P es el conjunto de lugares gráficamente representado por un círculo, T es el conjunto de transiciones representadas por una barra rectangular, A es un conjunto finito de arcos de lugares a transiciones o transiciones a lugares, k es la función de capacidad de un lugar p, que define el número de recursos que un lugar puede contener, W es la función de peso y M_0 es la marca inicial de la red. (Baldan et al., 2015; Zhou y Reniers, 2018; Lacerda y Lima, 2019).

Dependiendo de la información disponible, las redes de Petri pueden permitir representar y estudiar un sistema cualitativamente, basado solo en la estructura gráfica, tanto como cuantitativa o dinámicamente. (Silva y Recalde, 2007; Baldan et al., 2015; Kabir y Papadopoulos, 2019).

En un modelo de red Petri los lugares de entrada se conocen como precondiciones de una transición, que representan las condiciones que deben ser para que se habilite la transición y esté conectado a esta a través de arcos de entrada. Por otro lado, los lugares de salida se

conocen como condiciones posteriores de una transición, que representan el resultado de la misma y están conectados a ella través de arcos de salida. (Kabir y Papadopoulos, 2019)

Existen otras variantes diferentes de redes de Petri, como redes de Petri de colores (CPN), redes estocásticas bien formadas (SWN), y redes de predicados/transición. (Kabir y Papadopoulos, 2019).

Al igual que las redes bayesianas, las redes Petri tienen gran utilidad actualmente en los procesos industriales. En la tabla 2 se muestran diferentes aplicaciones de las mismas.

Tabla 2 Aplicaciones de las redes Petri en la industria de procesos

Autor y Año	Revista	Aplicación
Sachdeva et al., (2008)	International Journal of Quality & Reliability Management	Propusieron un método basado en redes Petri para evaluar la fiabilidad del sistema industrial de pulpa de papel.
Chung y Chang (2011)	Computers and Chemical Engineering	Plantearon un enfoque jerárquico para crear un modelo de red Petri para la operación de purificación en el proceso de Deposición de Vapor Químico Orgánico Metálico (MOCVD).
Ghasemieh et al. (2016)	Performance Evaluation	Formularon un modelo de Petri híbrido de diferentes fallas de componentes e interferencias externas para modelar el comportamiento del tratamiento de aguas residuales.
Renganathan y Bhaskar (2013)	Applied Mathematical Modelling	Expusieron un método utilizando redes Petri híbridos para diagnóstico de fallas en plantas de embotellado
Balasubramnian et al., (2002)	Ind. Eng. Chem. Res.	Un enfoque jerárquico fue desarrollado por para construir modelos de red Petri para el análisis de riesgo del amoníaco líquido en

		operaciones de carga en industrias de procesos
Ammar et al., (1997)	Proceedings of Fourth International Software Metrics Symposium.	Desarrollaron un método de evaluación de riesgos basado en redes Petri coloreadas para la evaluación de riesgos de la especificación funcional de sistemas de software en tiempo real.
Vernez et al. (2004)	Risk Analysis	Un método basado en redes Petri coloreadas llamado MORM (modelado de riesgos laborales hombre-máquina) ha sido desarrollado para la seguridad y salud laboral mediante la evaluación de riesgos en procesos industriales.
Kadri et al., (2012)	HAL (archives-ouvertes)	Aplicaron un nuevo método utilizando redes Petri coloreadas para la evaluación cuantitativa del riesgo de efecto dominó en las plantas industriales causado por la radiación de calor para procesar equipos y/o recipientes de almacenamiento
Guo et al., (2016)	Journal of Natural Gas Science and Engineering	Un marco integral de evaluación de riesgos basado en redes Petri difusas en combinación con el proceso de jerarquía analítica (AHP), el método de la entropía (EM) y el modelo de nube, ha sido propuesto para tuberías de transporte de petróleo y gas de larga distancia
Elusakin y Shafiee (2019).	Journal of Loss Prevention in the Process Industries.	Aplicaron un método de análisis avanzado utilizando redes estocásticas de Petri (SPN) para estimar la fiabilidad de sistemas submarinos (BOP) sujetos a mantenimiento basado en condiciones (CBM) con diferentes modos de fallo.

Un marco integral de evaluación de riesgos basado en redes Petri difusas en combinación con el proceso de jerarquía analítica (AHP), el método de la entropía (EM) y el modelo de nube, ha sido propuesto por Guo et al., (2016) para tuberías de transporte de petróleo y gas de larga distancia. El AHP junto con el método EM y el modelo de nube ayudan a abordar el tema relacionado con el carácter incierto, vago y aleatorio de factores de riesgo de oleoductos y gasoductos. El estudio de caso mostró que el resultado de la evaluación, obtenido por el método propuesto, es más práctico y confiable, y refleja cierta regularidad objetiva y científicidad.

En la industria del petróleo y las plantas químicas, el efecto dominó puede ocurrir si la consecuencia potencial del incendio primario o explosión no se mitiga y controla de manera efectiva. El riesgo de efecto dominó es mucho más difícil de predecir que el fuego típico o accidente de explosión ya que consiste en múltiples eventos en cascada y puede causar consecuencias bastante graves en términos tanto económicos como pérdidas humanas. (Huang, 2017; Zhou y Reniers, 2018; Hou et al., 2019).

Entre los elementos necesarios de un accidente de dominó según Reniers y Cozzani, (2013) se encuentran el escenario primario, secundario, la propagación, el escalado y vector de escalado. El escalado se requiere implícitamente para considerar un escenario de accidente como un efecto dominó, la propagación está asociada con el escalado, y los escenarios secundarios contribuyen a las consecuencias generales del evento.

La propagación (escalado) de un evento primario a los eventos secundarios se producen por medio de fenómenos físicos como la radiación de calor, la onda expansiva y proyección de fragmentos, estos se denominan vectores de escalado en el contexto del análisis del efecto dominó. (Khakzad et al., 2018).

Dentro de los accidentes dominó se pueden identificar dos tipos muy diferentes de escalado: escalado de eventos iniciadores de baja gravedad e interacción de diferentes eventos críticos. Estas dos categorías de escalamiento pueden ser específicas de un solo escenario, pero también pueden tener lugar en diferentes momentos de un solo accidente. Detectar estos dos modos diferentes de escalamiento es de fundamental importancia para la identificación de posibles efectos dominó. (Reniers y Cozzani, 2013)

En el primer tipo de escalado, la baja gravedad del evento iniciador tiene dos posibles efectos. Un posible efecto es que el potencial de escalado puede ser pasado por alto, y algunos escenarios críticos pueden no ser considerados en la evaluación de riesgo. El otro efecto es que la baja gravedad del evento limita su potencial de propagación, por lo tanto, el potencial de escalado solo afecta a la unidad donde puede tener lugar el evento principal. En el segundo tipo de escalado, la gravedad del evento primario es alta, por lo tanto, la propagación en el espacio es el factor principal que causa el escalado. (Reniers y Cozzani, 2013)

Reniers, (2010) introdujo el concepto de cardinalidad de dominó que es un término utilizado para indicar el número de enlace del evento dominó en una secuencia de eventos, comenzando desde el evento iniciador.

En caso de propagación simple, el evento dominó se puede clasificar como interno, espacial, serial y con cardinalidad 0. Los eventos dominó caracterizados con esta cardinalidad son los iniciadores o los llamados eventos de dominó primarios, mientras que la cardinalidad 1 se refiere a eventos secundarios, cardinalidad 2 a eventos dominó terciarios, etc. Además, un dominó multiplanta hace referencia al efecto que representa un accidente en aumento que involucra más de una planta química. Reniers y Cozzani, (2013). En la tabla 3 se muestran los tipos de efectos dominó así como sus características principales.

Tabla 3 Categorización de eventos dominó

Tipo Número	Instancia de Tipo	Definición de tipo
Tipo 1	Interno	Comienzo y fin del vector de escalamiento que caracteriza el evento dominó situado dentro de los límites de la planta química
	Externo	Comienzo y fin del vector de escalamiento que caracteriza el evento dominó que no está situado dentro de los límites de la misma planta química
Tipo 2	Directo	El evento de dominó ocurre como consecuencia directa del anterior evento dominó
	Indirecto	El evento dominó ocurre como consecuencia indirecta de un evento de dominó anterior, no siendo el anterior
Tipo 3	Temporal	El evento de dominó ocurre dentro de la misma área que el evento anterior, pero con retraso
	Espacial	El evento de dominó ocurre fuera del área donde el precedente evento

Tipo 4	De serie	El evento de dominó ocurre como un enlace consecuente de la única cadena de accidentes causada por el evento anterior
	Paralelo	El evento dominó ocurre como uno de varios simultáneos enlaces consecuentes de cadenas de accidentes causados por el evento anterior

Fuente: Reniers y Cozzani, (2013).

Los accidentes causados por el efecto dominó son los más destructivos relacionados con las plantas industriales. (Reniers, 2010; Landucci et al., 2013; Kadri et al., 2013; Kadri y Chatelet, 2014; Zhang et al 2019). Sus consecuencias pueden llegar a ser severas por lo que según Cozzani et al., (2013) recientemente se han realizado grandes esfuerzos de investigación para obtener y desarrollar metodologías y herramientas destinadas a abarcar el análisis de los escenarios dominó dentro de la evaluación cuantitativa de riesgos.

El riesgo de un accidente se define como el producto de la frecuencia y la magnitud de sus consecuencias según López, (2017). Situación que puede conducir a una consecuencia negativa no deseada en un acontecimiento, o bien probabilidad de que suceda un determinado peligro potencial. (Casal et al., 2002; BOE, 2015). El resultado de un análisis cuantitativo de riesgo es comúnmente expresado mediante los términos riesgo individual y riesgo social (Maaskant et al, 2010a; López, 2017).

Casal et al., (2002) señala que suele entenderse por riesgo individual la probabilidad de que una persona sufra consecuencias como resultado de su exposición, en un determinado lugar, a uno o varios peligros. Se define según Maaskant et al., (2010b) como la probabilidad anual de muerte de una persona desprotegida promedio en una ubicación predefinida.

Si el riesgo individual se expresa en términos de muertes, se puede definir como una función de las coordenadas espaciales, lo que representará la probabilidad de que un individuo situado en un punto durante un periodo de un año muera a causa del accidente producido en una planta industrial, ruta de transporte o instalación. La unidad usada para expresar el riesgo individual es el año⁻¹. (López, 2017).

Puede ser estimado para el individuo más expuesto, para grupos de individuos en lugares particulares o para un individuo promedio en una zona de efecto. (Renjith y Madhu, 2010).

Por lo que para la determinación del riesgo individual se debe tener en cuenta la vulnerabilidad que según Renda et al., (2017) es el factor interno de una comunidad o sistema. Comprende las características de la sociedad acorde a su contexto que la hacen susceptibles de sufrir un daño o pérdida grave en caso que se concrete una amenaza. Fue

definida por Sengupta, (2007) como el grado de daño a un elemento específico en riesgo para un fenómeno de peligro específico (por ejemplo, incendio, explosión o liberación de un compuesto tóxico) con cierta intensidad.

Existen dos métodos para la evaluación de vulnerabilidad, cualitativo y cuantitativo. Cualitativo se refiere a la expresión del grado de vulnerabilidad en términos de alta, moderada o baja. Por otro lado, los métodos cuantitativos se refieren a la expresión de vulnerabilidad en términos de valores, expresada en una escala entre 0 (sin daño) a 1 (daño/pérdida total) o como un porcentaje. (Sengupta, 2007; Patel et al., 2008; Chen et al., 2019).

Cualquier industria que maneje sustancias peligrosas está por ley obligada a valorar sus riesgos para prevenir la ocurrencia de un accidente mayor. A continuación se explican algunas metodologías que pueden ser aplicadas para evaluar el riesgo individual.

El Análisis de Riesgo Cuantitativo (QRA, por sus siglas en inglés) permite cuantificar la probabilidad esperada de eventos generadores de accidentes graves, así como las consecuencias dañinas en términos de muertos o heridos y daños tanto materiales como al medio ambiente. (Ibarra, 2016). Actualmente es muy utilizado para la determinación del riesgo individual pues es capaz de detectar los peligros más importantes. (Gai et al., 2016; Gai et al., 2019). QRA es la metodología más ampliamente aplicada para proporcionar información cuantitativa sobre el riesgo causado por accidentes convencionales en plantas químicas y de proceso, la mejor herramienta predictiva analítica disponible hasta la fecha para evaluar los riesgos de procesos y almacenamiento de instalaciones.(Cozzani et al., 2013).

El Modelo de Localización de Áreas de Atmósferas Peligrosas (ALOHA por sus siglas en inglés) permite evaluar el impacto que la concentración de la materia y energía tiene sobre las personas, la propiedad y el ambiente. (Márquez ,2016). Es un modelo de dispersión de aire desarrollado por la agencia de protección ambiental (EPA), que se puede usar como una herramienta para prever el movimiento y la dispersión de gases. Predice las concentraciones de contaminantes a favor del viento desde la fuente de un derrame, teniendo en cuenta las características físicas del material derramado (Renjith y Madhu, 2010).

Los modelos de efectos se utilizan para el análisis de impacto. Estos modelos determinan cómo las personas resultan lesionadas por la exposición al calor y la carga tóxica, para lo que hacen uso de una función Probit. En la función Probit existe un vínculo entre la carga y el porcentaje de personas expuestas que sufren un tipo particular de lesión. Están disponibles para una variedad de exposiciones, incluida la exposición a materiales tóxicos, calor, presión y radiación, impacto y sonido, se utilizan para calcular el porcentaje de letalidad y grados de quemaduras que ocurrirán en una carga térmica particular y en un período de exposición de un cuerpo desprotegido.(Renjith y Madhu, 2010).

Los mapas de riesgo son representaciones cartográficas que permiten visualizar la distribución de determinados riesgos de desastre en un territorio específico. Surgen de la combinación de mapas de amenaza y mapas de vulnerabilidad, cada uno de los cuales ya son el resultado de índices e indicadores específicos. Son, ante todo, una herramienta de análisis esencial que, entre otros usos, permite identificar zonas de mayor o menor riesgo frente a diferentes peligros. (Renda et al., 2017)

Las líneas de isorriesgo representan los diferentes niveles de riesgo individual en la zona analizada, afectada por el escenario accidental. Para poder establecer estas líneas es necesario calcular los escenarios accidentales que ocurrirán dadas unas circunstancias determinadas, las diferentes reacciones del sistema ante un incidente determinado, las condiciones meteorológicas así como los puntos donde se puede producir una ignición y su frecuencia. La forma de las líneas de isorriesgo depende de la naturaleza física de los efectos accidentales, de las condiciones atmosféricas (dirección y velocidad viento, etc.) y de las características del terreno. (López, 2017).

Conclusiones

Las redes bayesianas y Petri son muy útiles en la cuantificación del carácter continuado de accidentes, sobre todo aquellos que tienden a ocurrir en la industria petrolera, lo que se debe a su forma flexible y adaptable y su capacidad para analizar sistemas complejos. Los mapas de riesgo individuales representan una ventajosa herramienta para demostrar los efectos de una amplia variedad de riesgos y seleccionar las medidas de reducción de mortalidad. (Maaskant, et al., 2010b), junto al Análisis de Riesgo Cuantitativo, ALOHA y las funciones Probit descritas anteriormente constituyen una metodología completa y extensiva en la cuantificación del riesgo individual que provocan los accidentes tóxicos, de incendios y explosión por su efecto continuado.

Referencias bibliográficas

ALE, BEN; GULIJK, COEN VAN; HANEA, ANCA; HANEA, DANIELA; HUDSON, PATRICK; SILLEM SIMONE, PEI-HUI LIN Towards BBN based risk modelling of process plants. Safety Science Elsevier p. 1-9. [citado 25 de diciembre de 2019]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2013.12.007>. 2014

ALJAROUDI, ALIREDA; KHAN, FAISAL; AKINTURK, AYHAN; HADDARA, MAHMOUD; THODI, PREMKUMAR Risk Assessment of Offshore Crude Oil Pipeline Failure. Journal of Loss Prevention in the Process Industries Elsevier , p. 1-30 [citado 25 de diciembre de 2019]. Disponible en: DOI: 10.1016/j.jlp.2015.07.004. 2015

AMMAR, HANY H.; NIKZADEH, TOORAJ; DUGAN, JOANNE BECHTA. A methodology for risk assessment of functional specification of software systems using colored Petri nets. In: Proceedings of Fourth International Software Metrics Symposium. IEEE, p. 108–117. 1997.

BALDAN, PAOLO; BOCCI, MARTINA; BRIGOLIN, DANIELE; COCCO, NICOLETTA; SIMEONI, MARTA. Petri nets for modelling and analyzing trophic networks. BioPPN 2015, a satellite event of Petri Nets, CEUR Workshop Proceedings Vol. 1373, 2015.

BHANDARI, JYOTI; ABBASSI, ROUZBEH; GARANIYA, VIKRAM; KHAN, FAISAL Risk analysis of deepwater drilling operations using Bayesian network. Journal of Loss Prevention in the Process Industries Elsevier 38, p11-23. [citado 25 de diciembre de 2019]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2015.08.004>. 2015

BOE. Real Decreto 840/2015, de 21 de septiembre, por el que se aprueban medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas. Ministerio de la Presidencia. No. 251. BOE-A-2015-11268. 33p. 2015.

BRITO, MARIO; GRIFFITHS, GWYN A Bayesian approach for predicting risk of autonomous underwater vehicle loss during their missions. Reliability Engineering and System Safety Elsevier [en línea] 146, p.55-67. [citado 23 de diciembre de 2019]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2015.10.004>. 2016.

CASAL, JOAQUÍN; MONTIEL, HELENA; PLANAS, EULALIA; VÍLCHEZ, JUAN A. Análisis del riesgo en instalaciones industriales. 2da ed. Barcelona: Ediciones UPC. 362p. 2002.

CHEN, GUOHUA; HUANG, KONGXING; ZOU, MENGTING; YANG, YUNFENG; DONG, HAOYU A methodology for quantitative vulnerability assessment of coupled multihazard in Chemical Industrial Park. Journal of Loss Prevention in the Process

Industries Elsevier 58, p. 30-41 [citado 13 de enero de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.01.008>. 2019.

CHIN, KWAI-SANG; TANG, DA-WEI; YANG, JIAN-BO; WONG, SHUI YEE; WANG, HONGWEI Assessing new product development project risk by Bayesian network with a systematic probability generation methodology. Expert Systems with Applications Elsevier [en línea] 36, p. 9879–9890. [citado 23 de diciembre de 2019]. Disponible en: www.elsevier.com/locate/eswa DOI: 10.1016/j.eswa.2009.02.019. 2009.

CHUNG, LI-PING; CHANG, CHUEI-TIN. Petri-net models for comprehensive hazard analysis of MOCVD processes. Computers and Chemical Engineering Elsevier 35, p.356-371 [citado 28 de diciembre de 2019]. Disponible en: www.elsevier.com/locate/compchemeng.DOI:10.1016/j.compchemeng.2010.05.006. 2011.

COZZANI, VALERIO; ANTONIONI, GIACOMO; KHAKZAD, NIMA; KHAN, FAISAL; TAVEAU, JEROME; RENIERS, GENSERIK Quantitative Assessment of Risk Caused by Domino Accidents. Domino Effects in the Process Industries Elsevier p.208-228 [citado 13 de enero de 2020]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-54323-3.00010-5>. 2013.

CUI, YAN; QUDDUS, NOOR; MASHUGA, CHAD V. Bayesian network and game theory risk assessment model for third-party damage to oil and gas pipelines. Process Safety and Environmental Protection Elsevier 134 p. 178-188 [citado 13 de enero de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.11.038>. 2019.

ELUSAKIN, TOBI; SHAFIEE, MAHMOOD. Reliability analysis of subsea blowout preventers with condition-based maintenance using stochastic Petri nets. Journal of Loss Prevention in the Process Industries Elsevier. , p.1-29. [citado 28 de diciembre de 2019]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.104026>. 2019.

GAI, WEN-MEI; DENG, YUN-FENG; JIANG, ZHONG-AN; LI, JING; DU, YAN. Multi-objective evacuation routing optimization for toxic cloud releases. Reliability Engineering and System Safety p.1-32 [citado 20 de enero de 2020]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2016.10.021>. 2016.

GAI, WEN-MEI; JIA, HAI-JIANG; XI, XUE-JUN; DENG, YUN-FENG. Shelter-in-place risk assessment for high-pressure natural gas wells with hydrogen sulphide and its application in emergency management. Journal of Loss Prevention in the Process Industries Elsevier. 63, p.1-8. [citado 4 de enero de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.103993>. 2019.

GHASEMIEH, HAMED; REMKE, ANNE; HAVERKORT, BOUDEWIJN R. Survivability analysis of a sewage treatment facility using hybrid Petri nets. Performance Evaluation Elsevier p. 36-56 [citado 28 de diciembre de 2019]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.peva.2015.11.004>. 2016.

GÓMEZ MARES, MERCEDES. Estudio experimental y modelización matemática de dardos de fuego. Barcelona. 281 h. Tesis en opción al grado científico de Doctor. Universidad Politécnica de Catalunya. 2009.

GUO, YANBAO; MENG, XIAOLI; WANG, DEGUO; MENG, TAO; LIU, SHUHAI; HE, RENYANG. Comprehensive risk evaluation of long-distance oil and gas transportation pipelines using a fuzzy Petri net model. Journal of Natural Gas Science and Engineering Elsevier , p.1-42. [citado 28 de diciembre de 2019]. Disponible en: DOI: 10.1016/j.jngse.2016.04.052. 2016.

HOU, LEI; WU, XINGGUANG; WU, ZHUANG; WU, SHOUZHI. Pattern identification and risk prediction of domino effect based on data mining methods for accidents occurred in the tank farm. Reliability Engineering and System Safety Elsevier 193, p. 1-10 [citado 13 de enero de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106646>. 2019.

HU, JINQIU; ZHANG, LAIBIN; CAI, ZHANSHENG; WANG, YU; WAN, ANQI. Fault propagation behavior study and root causereasoning with dynamic Bayesian network basedframework. Process Safety and Environmental Protection Elsevier p. 1-12. [citado 22 de diciembre de 2019]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2015.02.003>. 2015.

HUANG, Y. Quantitative risk analysis for explosion safety of oil and gas facilities. Australia. 149 h. 281 h. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Psicología. The University of Western Australia. 2017.

KABIR, SOHAG; PAPADOPOULOS, YIANNIS. Applications of Bayesian networks and Petri nets in safety, reliability, and risk assessments: A review. Safety Science Elsevier [en línea].115, p.154-175 [citado 22 de diciembre de 2019]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.02.009>. 2019.

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 HAL Id: hal-01026495 p.1-18 [citado 8 de diciembre de 2019]. Disponible en: <https://hal.archives-ouvertes.fr/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 [en línea] No. 2, p. 66-76 [citado 8 de diciembre de 2019]. Disponible en: <http://www.agence-nationale-recherche.fr>. 2013.

KADRI, FARID; LALLEMENT, PATRICK; CHATELET ERIC. The Quantitative Risk Assessment of domino effect on Industrial Plants Using Colored Stochastic Petri Nets. HAL (archives-ouvertes) p.1-11. [citado 28 de diciembre de 2019]. Disponible en: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01002863v1>. 2012.

KHAKZAD, NIMA. Application of dynamic Bayesian network to risk analysis of domino effects in chemical infrastructures. Reliability Engineering and System Safety Elsevier [en línea], p.1-32 [citado 23 de diciembre de 2019]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2015.02.007>. 2015.

KHAKZAD, NIMA; AMYOTTE, PAUL; COZZANI, VALERIO; RENIERS, GENSERIK; PASMANN, HANS. How to address model uncertainty in the escalation of domino effects? Journal of Loss Prevention in the Process Industries Elsevier p. 1-24 [citado 13 de enero de 2020]. Disponible en: DOI: 10.1016/j.jlp.2018.03.001. 2018.

KHAKZAD, NIMA; KHAN, FAISAL; AMYOTTE, PAUL. Dynamic safety analysis of process systems by mapping bow-tie into Bayesian network. Process Safety and Environmental Protection Elsevier [en línea].91, p.46-53 [citado 23 de diciembre de 2019]. Disponible en: www.elsevier.com/locate/res. DOI: 10.1016/j.psep.2012.01.005. 2013a.

KHAKZAD, NIMA; KHAN, FAISAL; AMYOTTE, PAUL; COZZANI, VALERIO. Domino Effect Analysis Using Bayesian Networks. Risk Analysis [en línea], p. 292–306 [citado 23 de diciembre de 2019]. Disponible en: DOI: 10.1111/j.1539-6924.2012.01854.x. 2013b.

KHAKZAD, NIMA; KHAN,FAISAL; AMYOTTE, PAUL. Safety analysis in process facilities: Comparison of fault tree and Bayesian network approaches. Reliability Engineering and System Safety Elsevier [en línea].96, p.925-932 [citado 23 de diciembre de 2019]. Disponible en: www.elsevier.com/locate/res. DOI: 10.1016/j.res.2011.03.012. 2011.

LACERDA, BRUNO; LIMA, PEDRO U. Petri net based multi-robot task coordination from temporal logic specifications. Robotics and Autonomous Systems Elsevier 122 p. 1-13 [citado 13 de enero de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.103289>. 2019.

LANDUCCI, GABRIELE; COZZAN, VALERIO; BIRK, MICHAEL. Heat Radiation Effects. Domino Effects in the Process Industries Elsevier p. 70-114 [citado 13 de enero de 2020]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-54323-3.00005-1>. 2013.

LEONI, LEONARDO; BAHOOTOROODY, AHMAD; DE CARLO, FILIPPO; PALTRINIERI, Nicola. Developing a risk-based maintenance model for a Natural Gas Regulating and Metering Station using Bayesian Network. Journal of Loss Prevention in

the Process Industries Elsevier , p. 1-23. [citado 28 de diciembre de 2019]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.11.003>. 2018.

LI, LIANFA; WANG, JINFENG; LEUNG, HARETON; JIANG, CHENGSHENG Assessment of Catastrophic Risk Using Bayesian Network Constructed from Domain Knowledge and Spatial Data. Risk Analysis [en línea] 30, No. 7, p. 1157–1175. [citado 23 de diciembre de 2019]. Disponible en: DOI:10.1111/j.1539-6924.2010.01429.x. 2010.

LI, XINHONG; CHEN, GUOMING; ZHU, HONGWEI. Quantitative risk analysis on leakage failure of submarine oil and gas pipelines using Bayesian network. Process Safety and Environment Protection [en línea] p. 1-17 [citado 23 de diciembre de 2019]. Disponible en: <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.psep.2016.06.006>. 2016.

LÓPEZ, JAVIER. Análisis Cuantitativo de riesgos de Tuberías de Transporte de Sustancias Peligrosas. 116 h. Tesis en opción al Grado de Ingeniería Química. 2017.

LUCAS, DONALD D.; SIMPSON, MATTHEW, CAMERON-SMITH, PHILIP; BASKETT, RONALD L. Bayesian inverse modeling of the atmospheric transport and emissions of a controlled tracer release from a nuclear power plant. Atmospheric Chemistry and Physics p. 13521–13543 [citado 20 de enero de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.5194/acp-17-13521-2017>. 2017.

MAASKANT, B.; JONKMAN, S.N.; JONGEJAN, R.B. The use of individual and societal risk criteria within the Dutch flood safety policy (part 2): estimation of the individual and societal risk for the dike rings in the Netherlands. , p. 1-6. [citado 28 de diciembre de 2019]. 2010a.

MAASKANT, B.; JONKMAN, S.N.; JONGEJAN, R.B. The potential use of individual and societal risk criteria within the Dutch flood safety policy (part 1): Basic principles. Reliability, Risk and Safety. , p. 1-8. [citado 28 de diciembre de 2019]. 2010b.

MÁRQUEZ SUÁREZ, OMAR. Investigación de accidentes explosivos por la liberación de sustancias peligrosas: uso potencial del modelo de ALOHA. Revista del Ministerio Público [en línea] No.19, p. 427-460. [citado 28 de diciembre de 2019]. 2016.

PATEL, SANDIP C.; GRAHAM, JAMES H.; RALSTON, PATRICIA A.S. Quantitatively assessing the vulnerability of critical information systems: A new method for evaluating security enhancements. International Journal of Information Management Elsevier 28, p. 483-491 [citado 13 de enero de 2020]. Disponible en: DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2008.01.009. 2008.

RENDA, EMILIO; ROZAS GARAY, MARCELO; TORCHIA, NATALIA PATRICIA. Manual para elaboración de mapas de riesgos. Buenos Aires: Programa Naciones Unidas

para el Desarrollo PNUD; Argentina: Ministerio de Seguridad de la Nación. ISBN 978-987-1560-75-2. 72 p. 2017.

RENGANATHAN, K.; BHASKAR, VIDHYACHARAN. Modeling, analysis and performance evaluation for fault diagnosis and Fault Tolerant Control in bottle-filling plant modeled using Hybrid Petri nets. *Applied Mathematical Modelling Elsevier* 37, p. 4842–4859 [citado 28 de diciembre de 2019]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2012.07.059>. 2013.

RENIERS, GENSERIK. An external domino effects investment approach to improve cross-plant safety within chemical clusters. *Journal of Hazardous Materials Elsevier* 177, p. 167-174 [citado 13 de enero de 2020]. Disponible en: DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.12.013. 2010.

RENIERS, GENSERIK; COZZANI, VALERIO. Features of Escalation Scenarios. Domino Effects in the Process Industries. Elsevier p. 1-13 [citado 13 de enero de 2020]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-54323-3.00003-8>. 2013.

RENJITH, V.R; MADHU, G. Individual and societal risk analysis and mapping of human vulnerability to chemical accidents in the vicinity of an industrial area. *International Journal of Applied Engineering Research, Dindigul*. 1, ISSN 09764259. [citado 28 de diciembre de 2019]. 2010.

ROPERO, R.F.; AGUILERA, P. A; FERNÁNDEZ, A.; RUMÍ, R. Redes bayesianas: una herramienta probabilística en los modelos de distribución de especies. *Ecosistemas Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente [en línea]*. 23(1), p.54-60 [citado 22 de diciembre de 2019]. Disponible en: www.revistaecosistemas.net DOI: 10.7818/ECOS.2014.23-1.08. 2014.

SACHDEVA, ANISH; KUMAR, DINESH; KUMAR, PRADEEP. Reliability analysis of pulping system using petri nets. *International Journal of Quality & Reliability Management*. ,25 p.860-877. [citado 28 de diciembre de 2019]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1108/02656710810898667>. 2008.

SENGUPTA, ANANDITA. Industrial Hazard, Vulnerability and Risk Assessment for Landuse Planning: A Case Study Haldia Town, West Bengal, India. India. 147h. Tesis para optar por el grado de Máster en Ciencias en Geoinformación y Observación de la Tierra. Instituto Internacional de Ciencias de la Geoinformación y Observación de la Tierra e Instituto Indio de Teledetección (NRSA). 2007.

SHI, JIHAO; ZHU, YUAN; KHAN, FAISAL; CHEN, GUOMING. Application of Bayesian Regularization Artificial Neural Network in explosion risk analysis of fixed offshore platform. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries Elsevier* , p.1-40.

[citado 28 de diciembre de 2019]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.10.009>. 2018.

SILVA, M.; RECALDE, L. Redes de Petri continuas: Expresividad, análisis y control de una clase de sistemas lineales conmutados. RIAI. No 3, p. 5-33 [citado 20 de enero de 2020]. Disponible en: <http://riai.isa.upv.es>. 2007.

SIMON, CHRISTOPHE; MECHRI, WALID; CAPIZZI, GUILLAUME. Assessment of Safety Integrity Level by simulation of Dynamic Bayesian Networks considering test duration. Journal of Loss Prevention in the Process Industries Elsevier , p.1-32. [citado 28 de diciembre de 2019]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.11.002>. 2018.

TRUCCO, P; CAGNO, E.; RUGGERIB, F; GRANDE, O. A Bayesian Belief Network modelling of organisational factors in risk analysis: A case study in maritime transportation. Reliability Engineering y Sistem Safety Elsevier [en línea] 93, p.823-834. [citado 23 de diciembre de 2019]. Disponible en: www.elsevier.com/locate/ress. DOI: 10.1016/j.ress.2007.03.035. 2008.

VERNEZ, DAVID; BUCHS, DIDIER R.; PIERREHUMBERT, GILLAUME E. ; BESROUR, ADEL. MORM – A Petri net based model for assessing OH&S risks in industrial processes: modeling qualitative aspects. Risk Analysis. 24, p. 1719–1735. [citado 28 de diciembre de 2019]. 2004.

VILLA, VALERIA; COZZANI, VALERIO. Application of Bayesian Networks to Quantitative Assessment of Safety Barriers' Performance in the Prevention of Major Accidents. Chemical Engineering Transactions [en línea]. 53, p.151-156 [citado 22 de diciembre de 2019]. Disponible en: www.aidic.it/cet DOI: 10.3303/CET1653026. 2016.

VILLAFANE SANTANDER, DIANA. Estudio de la dispersión e incendio de nubes inflamables de gas (GNL y GLP). Barcelona.241 h. Tesis en opción al grado científico de Doctor. Universidad Politécnica de Catalunya.2013.

WANG, YALIN; YANG, HAIBING; YUAN, XIAOFENG; CAO, YUE. An improved Bayesian network method for fault diagnosis. IFAC Papers Online 51-21 Elsevier , p.341-346. [citado 28 de diciembre de 2019]. Disponible en: www.sciencedirect.com. 2018.

WU, JIANGSONG; ZHOU, RUI; XU, SHENGDI; WU, ZHENGWEI. Probabilistic analysis of natural gas pipeline network accident based on Bayesian network. Journal of Loss Prevention in the Process Industries Elsevier [en línea] 46, p.126-136. [citado 23 de diciembre de 2019]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2017.01.025>. 2017.

WU, XIN-YANG; WU, XIAO-YUE. Extended object-oriented Petri net model for mission reliability simulation of repairable PMS with common cause failures. Reliability

Engineering and System Safety Elsevier [en línea], p.126-136 [citado 23 de diciembre de 2019]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2014.11.012>. 2015.

YAZDI, MOHAMMAD. A review paper to examine the validity of Bayesian network to build rational consensus in subjective probabilistic failure analysis. Int J Syst Assur Eng Manag. Springer [en línea]. p. 1-18 [citado 22 de diciembre de 2019]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13198-018-00757-7>. 2018.

YUAN, CHANGFENG; CUI, HUI; MA, SIMING; ZHANG, YULONG; HU, YICHAO; ZUO, TAO. Analysis method for causal factors in emergency processes of fire accidents for oil-gas storage and transportation based on ISM and MBN. Journal of Loss Prevention in the Process Industries Elsevier 62, p. 1-17. [citado 25 de diciembre de 2019]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.103964>. 2019.

ZAREI, ESMAEIL; KHAKZAD, NIMA; COZZANI, VALERIO; RENIERS, GENSERIK. Safety analysis of process systems using Fuzzy Bayesian Network (FBN). Journal of Loss Prevention in the Process Industries Elsevier , p.1-37. [citado 28 de diciembre de 2019]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.10.011>. 2018.

ZHANG, MINGGUANG; ZHENG, FENG; CHEN, FUZHEN; PAN, WENJIE; MO, SIFAN. Propagation probability of domino effect based on analysis of accident chain in storage tank area. Journal of Loss Prevention in the Process Industries Elsevier p. 1-15 [citado 13 de enero de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.103962>. 2019.

ZHOU, JIANFENG; RENIERS, GENSERIK. Petri-net based evaluation of emergency response actions for preventing domino effects triggered by fire. Journal of Loss Prevention in the Process Industries Elsevier 51, p.94-101 [citado 20 de enero de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.12.001>. 2018.

ZHOU, KUIBIN; QIN, XIAOLE; WANG, ZHENHUA; PAN, XUHAO; JIANG, JUNCHENG. Generalization of the radiative fraction correlation for hydrogen and hydrocarbon jet fires in subsonic and choked flow regimes. Science Direct Elsevier 43, p. 9870-9876 [citado 13 de enero de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.03.201>. 2018.