

Universidad de Matanzas

Sede “Camilo Cienfuegos”

Facultad de Ciencias Técnicas

Departamento de Química



TRABAJO DE DIPLOMA

Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico.

TÍTULO: “Evaluación del impacto individual debido al efecto continuado de accidentes provocados por explosión en la producción de ácido sulfúrico en la UEB Rayonitro de Matanzas.”

Autora:

Claudia Beatriz Jerez Sousa

Tutor:

DrC. Yamile Martínez Ochoa

Ing. Pavel Ramos Fundora

Consultante:

Ing. Yanelys Cuba Arana

Matanzas, Cuba. 202

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo, Claudia Beatriz Jerez Sousa, declaro que soy la única autora de este Trabajo de Diploma y lo pongo a la disposición de la empresa UEB Rayonitro y de la Universidad de Matanzas, para hacer uso del mismo con el objetivo y finalidad que se estime conveniente, siempre que se respeten mis derechos como autor.



Claudia Beatriz Jerez Sosa

*“Nuestra recompensa se encuentra en el
esfuerzo y no en el resultado, un esfuerzo
total es una victoria completa”.*

Mahatma Gandhi

DEDICATORIA

A mis padres

A mi familia

A mi esposo

A mis tutores

Yamile y Pavel

AGRADECIMIENTOS

“La raíz de todo bien crece de la tierra de la gratitud”

Dalai Lama

A mis padres **Yamilka y Octavio** y a mi hermana **María Karla** por estar siempre y ser los promotores de mis sueños, por apoyarme en todo momento, por su esfuerzo y amor incondicional, por ser la luz que me guía. Por ser lo mejor de mi vida.

A mis abuelos **Alina y Jorge** por quererme tanto.

A mi esposo **Julio César** por apoyarme tanto en todo y tenerme tanta paciencia, por su entrega y amor sin límites, por ser la persona que me anime y me ayuda a seguir adelante.

A mis **tías y tíos**, mis **primas**, mis **suegros** por ser parte de mi vida.

A **toda mi familia** por brindarme todo su afecto.

A mi **tutora y amiga Yamile** por su enorme corazón, por enseñarme a amar esta gran carrera, por su esfuerzo y dedicación, por su confianza, por su ayuda insustituible.

A mi **tutor Pavel** por su enorme trabajo, por su gran ayuda para que esto fuera posible, por su gran corazón, por su entrega, por entender siempre mis preguntas capciosas.

A mis **amigas Danelys, María Karla**, por siempre estar ahí, por su amistad incondicional.

A mis **amigos Alexandra y Agustín**, una de mis parejas preferidas por siempre estar para mí, por las horas incansables de estudio, por apoyarme y aconsejarme.

A mis **amigas** del preuniversitario **María Fernanda, Irene, Patricia, Yaima y Greter**, por siempre estar a pesar de que cada una ha tomado un camino distinto en la vida.

A **Yanelys y Dainelys** por ayudarme tanto en la elaboración de esta investigación.

A todos los **profesores de Ingeniería Química** por su entrega, sus enseñanzas, por su contribución a mi crecimiento profesional.

A la **Universidad de Matanzas** por abrirme sus puertas.

A la **vida** por este nuevo triunfo, por ser siempre condescendiente conmigo, por enseñarme tanto todos estos años.

A todas aquellas personas que de una forma u otra me brindaron su apoyo y creyeron en la realización de esta tesis.

Gracias a todos.

RESUMEN

Esta investigación se realiza con el objetivo de evaluar el riesgo individual debido al carácter continuado de los accidentes tóxicos y explosión que se pueden producir en la UEB Rayonitro. Con este propósito se describe primeramente el proceso tecnológico que se desarrolla en la industria y se definen los escenarios de accidentes a partir de las sustancias almacenadas en los equipos. Posteriormente, se obtiene el alcance de cada evento mediante el empleo del *software* ALOHA. Subsecuentemente, se determina su frecuencia inicial a partir de sucesos reales recopilados en bases de datos internacionales para los fallos en calderas en los últimos 10 años y se cuantifica la probabilidad de escalado por los vectores correspondientes a través de ecuaciones Probit. Además, se desarrolló una red bayesiana para determinar la probabilidad conjunta del efecto dominó arrojando un valor de 9,91% por año. Finalmente se obtiene el riesgo individual expresado mediante mapas de isorriesgos, donde se muestran los efectos sinérgicos de los accidentes. Estos mapas permiten confirmar que pueden producirse a las distancias 25, 30 y 31 metros 10, cuatro y tres fatalidades respectivamente en 100 años.

ABSTRACT

This research is carried out with the objective of evaluating the individual risk due to the continuous nature of toxic accidents and explosions that can occur in the UEB Rayonitro. For this purpose, the technological process developed in the industry is first described and the accident scenarios are defined based on the substances stored in the equipment. Subsequently, the scope of each event is obtained using the ALOHA software. Subsequently, its initial frequency is determined from real events collected in international databases for boiler failures in the last 10 years and the probability of scaling by the corresponding vectors is quantified through Probit equations. In addition, a Bayesian network was developed to determine the joint probability of the domino effect, yielding a value of 9,91% per year. Finally, we obtained the individual risk expressed through iso-risk maps, where the synergic effects of the accidents are shown. These maps confirm that 10, four and three fatalities can occur at distances of 25, 30 and 31 meters, respectively, in 100 years.

Introducción.....	1
Capítulo 1: Marco teórico y referencial.....	4
1.1. Tipos de escenarios que se manifiestan a partir de accidentes tóxicos y/o explosiones en la industria de procesos	4
1.1.1. Tipos de accidentes de explosión que pueden ocurrir en hornos y carderas en la industria de procesos.....	8
1.3. Empleo de la inteligencia artificial en el análisis de riesgos probabilísticos	18
1.4. Herramientas para la evaluación y estimación del impacto individual de posibles escenarios explosión	21
Capítulo 2: Materiales y Métodos.....	27
2.1. Descripción del proceso de ácido sulfúrico	27
2.1.1. Caracterización del sistema horno – caldera.....	29
2.1. Caracterización del área de la instalación.....	30
2.2. Definición de los escenarios y equipos afectados.....	30
2.3. Estimación del alcance de los escenarios.....	30
2.3.1. Características y particularidades del <i>software</i> ALOHA	31
2.3.2. Modelación de explosiones tipo BLEVE en la caldera.....	34
2.3.3. Cuantificación de la intensidad de sobrepresión para el escenario de explosión	37
2.4. Definición de las posibles unidades secundarias.....	38
2.5. Cuantificación de la probabilidad de escalado del escenario de explosión.....	39
2.5.1. Determinación de la frecuencia del suceso inicial	40
2.6. Metodología para la elaboración de la red bayesiana de probabilidades	41
2.6.1. Características y particularidades del <i>software</i> Hugin	45
2.6.2. Cálculo de la probabilidad conjunta de la cadena de sucesos dominó.....	45
2.7. Metodología para la cuantificación del riesgo individual y social	46
Capítulo 3: Análisis de resultados	48

3.1. Análisis de los resultados del <i>software</i> ALOHA	48
3.1.1. Estimación del alcance del escenario nube tóxica de vapor para el sistema horno-caldera.....	48
3.1.2. Estimación del alcance del escenario nube tóxica de vapor por accidente en la torre de absorción	54
3.2. Estimación del alcance del escenario explosión por el método de la TNT equivalente.....	57
3.3. Resultados referidos a la probabilidad de escalado y de accidente del escenario de explosión.....	60
3.3.1. Determinación de la frecuencia inicial de los accidentes	60
3.3.2. Cuantificación de la probabilidad de escalado del accidente explosión.....	61
3.4. Resultado y análisis de la red bayesiana desarrollada	62
3.4.1. Resultados y análisis de la probabilidad conjunta de efecto dominó	65
3.5. Resultados y análisis del impacto individual debido al efecto continuado de accidente.....	65
3.6. Conclusiones parciales del capítulo	67
Conclusiones.....	69
Recomendaciones.....	70
Referencias bibliográficas	71

INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico experimentado por los países industrializados en las últimas décadas, ha llevado consigo al incremento de instalaciones industriales. La producción, manipulación y transporte de determinadas sustancias peligrosas han implicado asimismo la aparición de nuevos riesgos, que pueden originar accidentes graves en las plantas de proceso con un fuerte impacto sobre las instalaciones, la población y el entorno (Zerrouki y Smadi, 2017).

Un peligro químico se define como un conjunto de circunstancias que pueden tener consecuencias perjudiciales. Este último medido por su efecto sobre los seres humanos, los activos y el medio ambiente (Wang *et al.*, 2016). Con el inminente crecimiento de la industrialización y la densidad de población en el mundo, los accidentes continúan aumentando rápidamente. Para evitar tales accidentes, es necesario elevar el nivel de seguridad y protección en las industrias reduciendo o previniendo mejor su ocurrencia. Con este fin, se han propuesto y desarrollado un conjunto de metodologías para la evaluación de riesgos que incluyen análisis tanto cualitativos como cuantitativos (Tao *et al.*, 2020).

Según las necesidades actuales en el análisis predictivo probabilístico de riesgos resulta indispensable la actualización de las técnicas de análisis de riesgo clásicas y la integración con otras más sofisticadas, que permitan determinar la probabilidad de ocurrencia de los accidentes y su posibilidad de concluir en un efecto dominó a partir del desarrollo de un evento primario para así obtener resultados más confiables y por consiguiente mejorar los métodos de evaluación de riesgos en el desarrollo de estrategias para prevenir accidentes y en el diseño de medidas de mitigación (Tang *et al.*, 2018).

Recientemente, las redes bayesianas o las redes de creencias bayesianas se han utilizado ampliamente para el análisis de confiabilidad, seguridad y riesgo de sistemas complejos (Zerrouki y Tamrabet, 2015).

En Cuba existen diversas industrias químicas que representan por si mismas un alto riesgo de incendio y explosión por el elevado nivel de inflamabilidad y volatilidad de las sustancias que manejan. Tal es el caso de la UEB Rayonitro ubicada en la zona industrial de la ciudad de Matanzas, en la parte noreste de la ciudad, en la provincia de mismo nombre; cuenta con 11 instalaciones, donde el 50% se encuentra de regular a mal estado y en algunos casos sus áreas sub-utilizadas. Es una zona de gran complejidad por la diversidad industrial y por otra parte el nivel de concentración de industrias contaminantes que en el transcurso del tiempo se ha venido fomentando.

Dentro de la UEB se produce en la planta química el ácido sulfúrico, una planta asociada a altos niveles de riesgos principalmente relacionados con errores humanos, fallo de equipos, escape de gas y a eventos de origen natural con las posibilidades de agravantes por presencia de combustibles, recipientes con sustancias químicas y tóxicas o por ocurrencia de incendios, identificándose como los factores que más podrían incidir como causa para las mismas: Incendio por causas variadas, escape de sustancias químicas o tóxicas, explosión por concentración de nube de gas.

Por tal motivo esta investigación plantea como **problema:** ¿Cómo estimar el daño individual que se produce como consecuencia del carácter continuado de explosiones en el sistema horno-caldera de la UEB Rayonitro?

Con el propósito de resolver el problema anterior se establece la siguiente **hipótesis:** Si se realiza una evaluación mediante la integración de herramientas de inteligencia artificial con técnicas clásicas de análisis de riesgo que permitan cuantificar el impacto individual debido al efecto continuado de explosiones se podrán determinar el alcance de los daños humanos y medioambientales.

Por lo que el **objetivo general** de este trabajo es: Evaluar el impacto individual debido al efecto continuado de explosiones en el sistema horno-caldera de la UEB Rayonitro aplicando técnicas de inteligencia artificial integradas con técnicas clásicas de análisis de riesgo.

Los objetivos específicos se enumeran a continuación:

1. Estimar el alcance de los posibles escenarios que puedan producirse por explosión.
2. Pronosticar el efecto continuado de este tipo de accidente aplicando técnicas de inteligencia artificial.
3. Determinar el impacto individual por el carácter continuado de este accidente.

Capítulo 1: Marco teórico y referencial

En este capítulo se abordan diversas temáticas relacionadas con el análisis cuantitativo de riesgos, con el objetivo de establecer la metodología más aceptada que evalúe el impacto individual de accidentes provocados por una nube tóxica de vapor y explosión y el efecto continuado en caso el de las explosiones. Primeramente, se caracterizan los escenarios que se pueden manifestar en la industria relacionados a accidentes tóxicos y explosiones, se analizan las características que puede presentar el efecto dominó, en función de un análisis histórico de accidentes, se explican las herramientas que cuantifican la probabilidad de ocurrencia del efecto dominó, se evalúa el empleo de la inteligencia artificial en el análisis de riesgos probabilísticos específicamente el uso de redes bayesianas de probabilidades. Finalmente, se analizan las metodologías que pueden cuantificar el impacto individual de este tipo de accidente.

1.1. Tipos de escenarios que se manifiestan a partir de accidentes tóxicos y/o explosiones en la industria de procesos

El gran crecimiento y la rápida evolución tecnológica que ha experimentado la industria en general y la industria química en particular a nivel mundial, unido al incremento de inventarios de productos químicos en las instalaciones y en los diversos medios de transporte han provocado un aumento de la probabilidad de que ocurran grandes accidentes con un gran impacto sobre las personas, medio ambiente y economía de la sociedad (Casal, 2021). Este epígrafe está enfocado en analizar los diferentes escenarios de accidentes que pueden ocurrir debido a accidentes tóxicos y explosiones en la industria de procesos; así como sus características fundamentales.

Los incendios, las explosiones y la contaminación ambiental son los problemas “impredecibles” más serios que afectan las pérdidas de vidas y negocios en las industrias químicas en la actualidad. Los problemas han existido desde el inicio de las operaciones químicas a escala industrial a mediados del siglo pasado. Continúan ocurriendo con

impactos financieros cada vez mayores y reportajes noticiosos muy visibles. La implicación de la dirección en la prevención de estos incidentes es vital para evitarlos. Aunque desde algunas perspectivas, los “accidentes” se consideran no prevenibles, de hecho todos los accidentes, o más correctamente los “incidentes”, son prevenibles (Nolan, 2014).

Luego de los incendios, las explosiones son los sucesos más frecuentes a nivel industrial. Se puede definir una explosión como una liberación repentina de energía, que genera una onda de presión que se desplaza alejándose de la fuente mientras va disipando energía. Esta liberación tiene que ser, no obstante, bastante rápida y concentrada para que la onda que se genera sea audible. No es necesario, pues, que se produzcan daños para poder considerar este fenómeno como explosión. La energía liberada puede haber sido almacenada inicialmente bajo una gran variedad de formas: nuclear, química, eléctrica o de presión (Casal, 2021; HSE, 2018; Wells, 2003). Las explosiones en la industria pueden producirse ya sea en espacios abiertos, cerrados o por la explosión de recipientes (Casal, 2021).

En espacios abiertos se pueden producir explosiones de una nube de vapor no confinado. Esta se genera a raíz del escape de un vapor combustible o de un líquido a partir del cual se formará el vapor; puede ocurrir en una planta de proceso, durante un transporte o por la rotura de un gaseoducto. En cualquiera de estos casos, una vez formada la nube, esta puede dispersarse en el aire antes de que se produzca la ignición, sin causar daños; arder inmediatamente e iniciar así un incendio de charco; dispersarse en un área extensa y producirse la ignición al cabo de un cierto tiempo, de manera que se formará una gran llamarada; y además que el frente de la llama se acelera tanto que genera una onda de sobrepresión. Por otra parte, estas son una de las explosiones más peligrosas que ocurren usualmente en la industria química debido a que los escapes tóxicos pueden producir más víctimas y, por otra parte, al alcance que puede llegar a tener la nube, la ignición de ésta puede producirse en un punto alejado de la fuente

origen del vertido y afectar a grandes áreas (Atkinson, 2017; Atkinson *et al.*, 2017; Casal, 2021; Huang, 2017).

En espacios cerrados puede producirse explosiones por una mezcla gaseosa inflamable cuando habiéndose producido un escape de un gas o de un vapor inflamable en un área confinada, el gas está dentro de los límites de inflamabilidad y encuentra un punto de ignición (Casal, 2021; Hedlund, 2018).

Otro tipo de explosión es la explosión mecánica de recipientes. De acuerdo con Galán Fontenla (2018), existen dos causas fundamentales por las que se produce la rotura de un recipiente:

- Por debilidad estructural (corrosión, erosión, fatiga, defecto de los materiales, etc.), por impactos externo; estos casos son muy poco frecuente, pero pueden ser particularmente peligrosos si el contenido del recipiente es inflamable.
- Por aumento de la presión interior debido a diferentes causas, entre ellas: sobrellenado, reacción fuera de control, explosión interna, fallo de un sistema de seguridad, calentamiento desde el exterior (a causa de un incendio o por cualquier otra razón), de manera que la presión en el interior va aumentando mientras el recipiente va perdiendo también resistencia por el aumento de temperatura, hasta que se produce la rotura (Casal, 2021; Wells, 2003).

Las explosiones de tipo BLEVE (*Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion*) son uno de los peores accidentes que pueden ocurrir en la industria química o en el transporte de mercancías peligrosas en el cual puede ocurrir una ruptura catastrófica. En la mayoría de los casos la sustancia involucrada es combustible; esto provoca que la explosión sea seguida por la formación de una bola de fuego, de efectos muy graves (Birk *et al.*, 2018; Casal, 2021; Gyenes *et al.*, 2017; HSE, 2018; Laurent *et al.*, 2016).

En general cuando se habla de BLEVE, a lo que se hace referencia realmente es a la combinación de los fenómenos BLEVE más bola de fuego. La acción dicha combinación

puede sintetizarse en los efectos siguientes: radiación térmica, onda de sobrepresión, fragmentos despedidos por la explosión y lluvia eventual de sustancias en los alrededores (Birk *et al.*, 2018; Casal, 2021). Si la sustancia contenida inicialmente en el recipiente no es combustible, la onda de sobrepresión y la proyección de fragmentos serán los únicos efectos de la explosión (Casal, 2021; Gai *et al.*, 2020).

Según Casal (2021); (Gai *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2019) entre los escenarios que determinan fenómenos peligrosos asociados a la concentración de una sustancia emitida al ambiente (de tipo térmico para sustancias inflamables y de tipo químico para sustancias tóxicas) se encuentra el escape de un producto tóxico o inflamable en forma gaseosa, o bien en forma líquida en condiciones de ser vaporizado, que produce una nube de gas, lo que representa una gran amenaza para la salud y el medio ambiente. La emisión y formación de nubes tóxicas están consideradas como los accidentes graves de mayor peligrosidad (respecto a sus posibles consecuencias) y de mayor complejidad de modelización. La peligrosidad viene determinada por el nivel de toxicidad de las sustancias involucradas y por la persistencia (permanencia) y alcance de las nubes (Gai *et al.*, 2018; Jiao *et al.*, 2021; Reche Motos, 2018).

La nube tóxica se forma a partir de la dispersión de gases con características toxicológicas. En este sentido, de los diferentes accidentes desarrollados que pueden considerarse como consecuencia de la emisión de una sustancia, las mayores distancias de consecuencias suelen venir asociados a las nubes tóxicas, donde el concepto de interés es la dosis inhalada (Gai *et al.*, 2017; Sajid *et al.*, 2021).

La dispersión de una nube de gas sigue una difusión, o transporte de su masa, producida por el movimiento molecular del aire mientras se va diluyendo a medida que va disminuyendo su concentración, a causa de la entrada de nuevas moléculas de aire dentro de la nube. La dispersión incluye el desplazamiento de la masa en la dirección del viento y su expansión en sentido transversal al viento, tanto vertical como horizontal.

En el caso de gases pesados la dispersión se produce incluso en dirección contraria al viento (Casal, 2021; Gai *et al.*, 2017; Jiao *et al.*, 2021).

Para describir la evolución de nubes tóxicas en la atmósfera es muy importante conocer el grado de estabilidad atmosférica que existe, pues las distintas variables meteorológicas afectan en menor o mayor grado la dispersión atmosférica de contaminantes, y a su vez, presentan una gran variabilidad estacional diaria (Nair *et al.*, 2022; Singh yChandra, 2019). El viento, la estabilidad atmosférica, la temperatura, la humedad relativa y la inversión térmica son las principales variables meteorológicas que afectan la dispersión de nubes de contaminantes definidas por Casal (2021). Estas dependen de la estación del año y algunas se emplean para el cálculo de la velocidad de evaporación de un líquido. Además, desde el punto de vista de la dispersión de gases, la inversión térmica tiene un efecto muy importante ya que impide la dispersión en altura y provoca su reflexión hacia las capas bajas atmosféricas.

Kadri yChatelet (2013), explican que las emisiones tóxicas, específicamente la liberación de productos químicos tóxicos de procesos o sitios de almacenamiento, junto a las explosiones se encuentran entre las fuentes potenciales de origen tecnológico más frecuentes de un efecto dominó. Aunque recientemente, un inventario de los accidentes pasados revela que las explosiones son la causa más frecuente de efecto dominó (57%), seguido de incendios (43%).

1.1.1. Tipos de accidentes de explosión que pueden ocurrir en hornos y calderas en la industria de procesos

Los hornos y las calderas son equipos con gran utilidad en la industria de procesos, estos tienen grandes probabilidades en la ocurrencia de accidentes de tipo explosiones por sus características y por las sustancias con que se emplean. Estos equipos en una planta química, pueden causar condiciones inseguras para los trabajadores y la

probabilidad de que surja un peligro que resulte en discapacidad e incluso la muerte. La falla crítica de la degradación de estos durante su operación es perjudicial en términos de costo, seguridad y efectos ambientales (Alaw y Sulaiman, 2020; Zong *et al.*, 2017).

Las calderas, sean estas de combustibles fósiles, biomasa, biocombustibles o combustibles alternos, alcanzan durante su operación normal temperaturas y presiones que pueden presentar serios riesgos a los operarios de la planta y a equipos adyacentes, tanto en ambientes industriales, comerciales y servicios, así como institucionales. De ahí que sea necesario contar con un estricto marco de seguridad para su operación; que contemple desde la planificación del proyecto, ubicación, construcción, la puesta en marcha, la operación normal de la misma, así como aspectos de capacitación, mantenimiento, inspección, almacenaje y su retiro de la instalación (Casal, 2021; Hardy y Modlinski, 2017).

En una caldera las condiciones de temperatura y presión del agua son muy superiores al punto de ebullición a presión atmosférica, puede producir un accidente mayor del tipo BLEVE, sin embargo, el agua en condiciones normales no presenta peligro de explosión. El conocimiento de las posibles condiciones de operación normales y anómalas permite considerar y eliminar diferentes sustancias como susceptibles de provocar un accidente mayor (Casal, 2021; Morales-Vargas, 2020).

El exceso de aire en la caldera y la distribución de aire y combustible a los quemadores y boquillas individuales afectan la aparición de zonas de reducción en la capa límite. Esto genera que a partir de las paredes de la cámara de combustión de la caldera se comience a corromper la misma, lo conlleva a que ocurra una explosión mecánica de recipientes por debilidad estructural. Al mismo tiempo, el exceso de aire es muy importante para la calidad de la combustión y la eficiencia de la caldera (Hardy y Modlinski, 2017).

Otro caso sería cuando la caldera se calienta desde el exterior (a causa de un incendio o por cualquier otra razón), de manera que la presión en el interior va aumentando mientras el recipiente va perdiendo también resistencia por el aumento de temperatura, hasta que se produce la rotura (Casal, 2021; Wang *et al.*, 2015).

En los hornos los riesgos de corrosión son causados en gran parte por la atmósfera reductora cerca de las paredes del horno y la aparición de zonas con déficit de oxidante y altas concentraciones de CO. Los estudios existentes han demostrado que la medición de O₂ y/o CO en la capa límite puede ser un buen indicador para la evaluación del riesgo de corrosión. Como mismo sucede con las calderas, la aparición de corrosión en un horno puede traer consigo una explosión por la debilidad estructural de este. Estos casos son muy poco frecuentes pero pueden ser particularmente peligrosos si ocurren (Casal, 2021; Hardy y Modlinski, 2017; Larsson *et al.*, 2018).

La bibliografía especializada refiere que los accidentes tóxicos y explosiones son de los accidentes más frecuentes en la industria de procesos de ahí que sea de suma importancia el estudio y evaluación de su impacto, principalmente en las personas. Además, los hornos y las calderas son de los recipientes más susceptibles a estos accidentes en la industria de proceso. A criterio de la autora de este trabajo, los escenarios relacionados a accidentes tóxicos y explosiones que se deben analizar son: nubes tóxicas, BLEVE debido a una expansión isoentrópica.

1.1. Análisis históricos del efecto continuado de accidentes en procesos industriales

En este epígrafe se explican las formas en que puede ocurrir el efecto dominó en la industria de procesos. Se realiza un resumen del análisis histórico de accidentes referido por los investigadores de la temática relacionado a los casos de efecto dominó ocurridos en la historia. Se explican las diferentes clasificaciones que puede tener el efecto dominó

según la forma en que suceden. Finalmente se emite un criterio acerca del escalado de accidentes en las industrias de procesos.

El análisis histórico de accidentes es una forma de estudiar cómo y cuándo los accidentes pueden ocurrir y de determinar cuáles son las secuencias más comunes en las que ocurren. El estudio de accidentes específicos muestra qué se hizo erróneamente y cuáles son las medidas que deberían ser aplicadas para evitar su ocurrencia en el futuro (Cai, Liu, Fan, *et al.*, 2016; Cai *et al.*, 2020; Casal y Darbra, 2013).

Específicamente, el análisis histórico referido al efecto dominó es una tarea compleja ya que las bases de datos de accidentes generalmente contienen información incompleta acerca de estos y en muchos casos se hace difícil determinar hasta qué nivel ocurrió la secuencia del efecto dominó (Casal y Darbra, 2013; Khakzad *et al.*, 2018b).

El análisis de la evidencia de los accidentes ocurridos en la historia plantea que la falla de cualquier equipamiento que pueda causar una pérdida de contención de sustancias peligrosas, o que puede, directamente, liberar energía debido a una explosión interna (explosión confinada, BLEVE) pueden potencialmente ser considerados como una causa común de accidente dominó (Casal, 2021; Chen *et al.*, 2018; Nomen *et al.*, 2014).

El elemento principal que identifica a los escenarios donde un efecto dominó ocurre es el efecto de propagación. Para identificar el elemento propagación existe dos sucesos principales: la presencia de un escenario de accidente primario y uno o más escenarios de accidente secundarios (Casal, 2021; Lisi *et al.*, 2014; Ștefănescu *et al.*, 2018).

En el anexo 1 se muestran las diferentes alternativas de propagación que se pueden asumir en el análisis de los escenarios dominó. Una propagación simple se asume, a partir de la definición de la correspondencia uno a uno, que es, un escenario primario simple que provoca un simple escenario secundario. Alternativamente, se tiene propagación del tipo segundo, tercero y cadena multinivel: un escenario de accidente primario que provoca un escenario de accidente secundario, a su vez, el segundo

escenario secundario provoca un escenario de accidente terciario y así sucesivamente (Chen *et al.*, 2018; Nomen *et al.*, 2014; Reniers y Cozzani, 2013)

Los accidentes dominó generalmente incluyen más de una sustancia, por ejemplo, R. M. Darbra *et al.* (2010) identificaron 335 sustancias en los 225 accidentes analizados. Las sustancias inflamables están asociadas con la mayoría de estos accidentes. Abdolhamidzadeh *et al.* (2011); (R. M. Darbra *et al.*, 2010), obtuvieron que un 89% de las sustancias relacionadas a los accidentes dominó fueron sustancias inflamables.

En el anexo 2 se muestra un árbol de probabilidad relativa realizado por R. Darbra *et al.* (2010) donde se ilustran las diferentes secuencias de efecto dominó así como la frecuencia y probabilidad con que ocurre cada una en un estudio con 225 accidentes analizados. Se muestra que los eventos primarios fueron el fuego (52,4%) y explosión (47,6%). Se registró un accidente de cuarto nivel en un solo caso (con la secuencia fuego / explosión / fuego / explosión). Las secuencias finales de dominó más frecuentes fueron: explosión / fuego (27,6%), fuego / explosión (27,5%) y fuego / fuego (17,8%). De estos accidentes estudiados, 193 involucró un efecto dominó (es decir, accidentes primarios más secundarios), mientras que solo 32 involucró al menos dos efectos dominó (una secuencia de primaria más secundaria más accidentes terciarios) (R. Darbra *et al.*, 2010).

Existen bancos de datos tabulados por diversas agencias que indican que los fallos en calderas tienen una frecuencia de 0,9-4,0 fallos/año, lo que genera limitaciones a la fiabilidad y seguridad de la operación de las empresas. En particular los fallos en válvulas de alivio se estiman en 0,03-0,08 fallos/año, y los controladores de nivel entre 0,03 y 2,0 fallos/año. Otra causa común de explosiones se da por acumulación de combustibles en los tubos u hornos, liberándose súbitamente la energía de la combustión, pero usualmente generando daños solamente internos a la caldera, cañón de fuego, tubos, ladrillos refractarios, pero sin sobrepasarse los límites constructivos del equipo que

contiene la presión operativa del lado de agua, por lo que no se analizan en el presente estudio (Morales-Vargas, 2020; Shrivastava y Patel, 2014).

Datos estadísticos publicados por el *National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors*, correspondientes al 2002, indican que el 85 % de los accidentes en calderas son atribuibles a dos causas; bajo nivel de agua (49 %); y error en la operación o mantenimiento deficiente (36 %). El reporte menciona además que, con índices mucho menores, figuran los accidentes asociados a deficiencias en el diseño y fabricación, fallas en los controles y los quemadores, instalación inadecuada, fallas en válvulas de seguridad y reparaciones inadecuadas (Harrison, 1977).

A criterio de la autora de este trabajo el análisis histórico de accidentes evidencia una tendencia ascendente en cuanto al número de muerte provocada por los mismos en los últimos años. La secuencia del efecto dominó debe ser estudiada hasta los posibles accidentes cuaternarios, siempre que sea posible, puesto que a partir de aquí la probabilidad de escalado disminuye cuantitativamente. La aplicación de medidas de seguridad adecuadas reduce sustancialmente la frecuencia de este tipo de accidentes. Cualquier información que se derive de accidentes pasados es de suma importancia para implementar estas medidas.

1.2. Metodologías de cuantificación de riesgos por efecto continuado o dominó

En este epígrafe se analizan algunas de las técnicas que existen actualmente para determinar la probabilidad de escalado de un accidente primario de explosión dentro de un área de la industria, para ello se estudian los tipos de efectos dominó existentes y sus características principales.

El análisis de accidentes dominó da la posibilidad de investigar fallas específicas de diversos escenarios de escalado: los eventos que más frecuentemente provocan un accidente dominó, las secuencias de escalado más frecuentes, las sustancias peligrosas

que son más propensas a estar involucradas en este tipo de accidentes. El escenario dominó muestra, de forma general una mayor severidad con respecto a los escenarios convencionales. Este se puede dividir en dos etapas principales: la evaluación del escenario primario y el vector de escalado y la evaluación de posibles efectos de escalado (Argenti *et al.*, 2014; Khakzad yReniers, 2015; Nomen *et al.*, 2014; Reniers yCozzani, 2013).

Se puede identificar una correspondencia entre tres enfoques convencionales ampliamente utilizados para la evaluación de peligros y riesgos, (Khakzad *et al.*, 2018a; Less, 2012) y el correspondiente nivel de detalle requerido para la evaluación de los escenarios dominó:

- El Análisis Cuantitativo de Riesgos (QRA) (puede ser adecuado para comprender el riesgo debido a los escenarios dominó, para identificar puntos o escenarios críticos y propósitos regulatorios).
- El análisis de peligros preliminar (PHA) (se usa ampliamente en las primeras fases de diseño y puede aplicarse para comprender la posibilidad de eventos de escalado).
- Se puede llevar a cabo un modelo de parámetros distribuidos (dirigidos a un accidente en el peor de los casos o un análisis de credibilidad máxima para evaluar la base del diseño o para obtener datos detallados sobre un escenario de interés específico).

Numerosas normativas internacionales obligan a realizar el Análisis Cuantitativo de Riesgo (QRA) en instalaciones que manejen sustancias peligrosas. Dicho análisis se emplea en muchas áreas de aplicación, y en la literatura científica se han presentado numerosos modelos y aplicaciones específicas con el objetivo de implementar la seguridad tanto en el diseño como en la operación de procesos (Zhang *et al.*, 2018).

En la fase de evaluación de la seguridad operacional del PHA o cuando se requiere una evaluación cualitativa de los riesgos de dominó, el análisis del escalado puede realizarse sobre la base de una evaluación simplificada de escenarios primarios, utilizando valores de umbral para la identificación de posibles equipos afectados (Markert, 2018; Reniers yCozzani, 2013). Además, los modelos de parámetros distribuidos requieren una descripción detallada del diseño del equipo involucrado en el escenario primario (Tugnoli *et al.*, 2022).

En los últimos años, los códigos de dinámica de fluidos computacional (CFD) basados en las ecuaciones de *Navier-Stokes* de Reynolds se han desarrollado específicamente para la evaluación de las consecuencias de las explosiones de gas en escenarios de mediana y gran escala. También se lograron avances relevantes en el desarrollo de herramientas de CFD capaces de simular chorros de fuego y charcos de fuego (Reniers yCozzani, 2013).

Según Reniers yCozzani (2013), no es práctico usar CFD para reproducir el comportamiento de la propagación de onda expansiva o la intensidad de radiación en el campo lejano, debido a la gran cantidad de recursos de compuerta y el tiempo generalmente requerido para aumentar el dominio numérico

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.*, 2018a).

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).

Si se identifica un peligro de escalado relevante, puede ser necesaria una evaluación más detallada que la basada en los valores de umbral de daño. El QRA se utiliza como una herramienta estándar para analizar y comparar el riesgo en las instalaciones de la industria (Chen *et al.*, 2018; Vieira *et al.*, 2017).

La determinación de valores umbrales confiables es clave para la selección de escenarios de propagación creíbles, los que resultan imprescindibles para cuantificar y evaluar accidentes considerando una serie de eventos sucesivos. Si el daño generado por un evento primario supera un cierto valor umbral, el efecto dominó es posible (Khakzad *et al.*, 2018a; Vieira *et al.*, 2017).

Según Necci (2019), los modelos de vulnerabilidad de equipos son las herramientas más usadas para permitir la evaluación de probabilidad e intensidad de escenarios secundarios, debido a la necesidad de un análisis minucioso de las consecuencias del escenario primario y el daño estructural potencial causado por los recipientes secundarios.

Otra herramienta para llevar a cabo un análisis preliminar de la amenaza de dominó es el denominado Instrumento para los Efectos Dominó (IDE) (Alileche *et al.*, 2017). Esta se basa en conectar establecimientos causantes y establecimientos vulnerables con respecto a los efectos dominó. Los establecimientos están acoplados determinando distancias típicas de escalado. Las distancias están relacionadas con posibles efectos físicos que pueden causar la propagación y escalado del evento primario en las otras

instalaciones consideradas. Los escenarios de accidentes incluidos en el IDE son el estallido de los recipientes a presión, el líquido en ebullición, la evaporación de las explosiones de vapor que dan lugar a la proyección de fragmentos, las explosiones de nubes de vapor, los charcos de fuego y los chorros de fuego (Alileche *et al.*, 2017; Reniers yCozzani, 2013).

El IDE solo considera sistemas de contención e instalaciones con sustancias explosivas, inflamables, o altamente inflamables, ofrece tabulaciones de distancias de dominó calculadas para parejas estándares de instalaciones. Para los casos que se desvían del procedimiento estándar (por ejemplo, mezclas de sustancias), se puede utilizar un método descrito en el IDE para calcular manualmente las distancias de dominó (Alileche *et al.*, 2017; Reniers yCozzani, 2013).

El uso de estos métodos es atractivo y útil en una etapa preliminar de la evaluación de riesgos de dominó, pero los umbrales de escalado representan una simplificación excesiva del problema y deben utilizarse con extrema precaución. Los umbrales de escalado son inherentemente empíricos y están muy influenciados tanto por las características del escenario primario como por las características geométricas y mecánicas del objetivo secundario (Khakzad *et al.*, 2018a). Estos están generados por el escenario de accidente primario, el cual causa su propagación (Necci, 2019)

Este método solo proporciona una respuesta de sí / no con respecto a la probabilidad de que el objetivo se vea afectado por el escenario principal de preocupación. Los resultados de la aplicación proporcionan una evaluación que puede ser útil para identificar los posibles equipos afectados por el escalado teniendo en cuenta un conjunto de escenarios principales (Khakzad *et al.*, 2018a).

A criterio de la autora de este trabajo es posible el cálculo de la posibilidad de escalado mediante las metodologías antes expuestas las cuales están validadas científicamente por el análisis bibliográfico efectuado en el mismo

1.3. Empleo de la inteligencia artificial en el análisis de riesgos probabilísticos

La cuantificación de la probabilidad del efecto dominó es una tarea compleja debido a los efectos múltiples y sinérgicos entre todos los accidentes que deben incluirse en el análisis. Sin embargo, estas técnicas podrían integrarse con otras para representar la ocurrencia del efecto dominó de manera confiable. En este asunto, la inteligencia artificial juega un papel fundamental (Dueñas Santana, Orozco, Febles Lantigua, *et al.*, 2021).

El uso de la inteligencia artificial dentro del análisis cuantitativo de riesgos ha ganado popularidad en estudios publicados recientemente debido a la alta confiabilidad y adaptabilidad ante nuevas evidencias (Dueñas Santana, Orozco, Febles Lantigua, *et al.*, 2021; Dueñas Santana, Orozco, Furka, *et al.*, 2021). Este epígrafe está enfocado en analizar las técnicas de inteligencia artificial que son utilizadas dentro del análisis probabilístico de riesgos enfatizando en las redes Bayesianas.

La evaluación cuantitativa de riesgos (QRA) es un enfoque muy útil y efectivo para medir riesgos y diseñar y estrategias de seguridad mitigativas en plantas de proceso (Zarei *et al.*, 2017). Según Markert (2018) la QRA para los escenarios de dominó ha demostrado ser viable y proporcionar resultados valiosos. Las cifras cuantitativas de riesgo permiten la clasificación de los escenarios dominó y la identificación de criticidades.

Aunque las técnicas QRA convencionales han jugado un papel clave en la mejora del nivel de seguridad de los sistemas de proceso durante las últimas décadas, adolecen de limitaciones, especialmente cuando se trata del análisis dinámico de riesgos de las plantas de proceso (Ping *et al.*, 2018). Estos inconvenientes se deben principalmente a la naturaleza estática y la ineficacia de las técnicas convencionales para tratar la incertidumbre.

Para ayudar a las técnicas convencionales de QRA a tener en cuenta la incertidumbre de una manera más eficiente, algunos autores han combinado técnicas convencionales con la teoría difusa o la teoría de la evidencia (Ping *et al.*, 2018), o han empleado técnicas más sofisticadas como Petri Nets y la red bayesiana, se ha comprobado que supera a otras técnicas debido a su capacidad para modelar variables de múltiples estados, fallas de causa común, dependencias y actualización de creencias (Zerrouki ySmadi, 2017).

La red bayesiana es un modelo de inferencia gráfica robusto que puede usarse para un modelado integral de escenarios de accidentes, teniendo en cuenta las interacciones entre las causas raíz del accidente en las barreras de seguridad *in situ* y los resultados potenciales, estas permiten no solo la actualización de los datos en función de la nueva evidencia suministrada (por ejemplo, que ocurra un accidente real en una de las unidades de procesos o una rotura en una de las tuberías de entrada o salida de los tanques, aumenta la probabilidad de accidentes en el resto de los equipos); sino también la cuantificación del efecto dominó a cada nivel de escalado posible. Esto convierte a las redes Bayesianas en esenciales dentro del estudio del efecto dominó. Sin embargo, presentan limitaciones a la hora de diferenciar las probabilidades, como se hace necesario entre las probabilidades de daño y escalado (Cai, Liu,yFan, 2016; Kabir yPapadopoulos, 2019; Khakzad *et al.*, 2018a; Villa yCozzani, 2016).

El empleo de esta técnica de inteligencia artificial para la estimación de accidentes de incendio y explosiones en la industria de procesos se basa en el teorema de Bayes lo cual permite la incorporación de nueva evidencia; a pesar de esto ofrece una información que limita el conocimiento acerca de los mecanismos de transmisión. Esta técnica brinda resultados con gran índice de confiabilidad y un nivel alto de precisión en cuanto al razonamiento bajo altos niveles de incertidumbre, pero en el momento del análisis de riesgo solo permite una sola incorporación de probabilidades resultando esto muy desventajoso desde el punto de vista cualitativo y operacional. También refleja la interacción entre los diferentes eventos dentro de la cadena de efecto dominó y permite

la cuantificación de la probabilidad de este efecto a diferentes niveles de escalado; aunque el uso de redes bayesianas tiene estas grandes ventajas está basada en valores estimados absolutos lo que presenta resultados no tan exactos (Cai, Liu,yFan, 2016; Kabir yPapadopoulos, 2019; Khakzad *et al.*, 2018a; Leoni *et al.*, 2019; Ropero *et al.*, 2014).

Varias investigaciones recientes utilizando redes bayesianas como método de estimación de probabilidades de riesgos industriales, demuestran que a pesar de sus desventajas resultan útiles para este campo y aún más con el creciente desarrollo de la inteligencia artificial a nivel mundial. Dueñas Santana, Orozco, Febles Lantigua, *et al.* (2021), cuantificaron el impacto individual de los escenarios de efecto dominó utilizando un método integrado de redes bayesianas y redes Petri, proponiendo un modelo de siete pasos basado en una combinación de métodos probados para obtener un nuevo método con las ventajas de ambas estructuras gráficas, incluyendo la capacidad de minimizar sus limitaciones. Obteniendo como resultado que al aplicar este modelo se reduce la ocurrencia de incidentes a un 59%.

Santana *et al.* (2020), determinaron la probabilidad de fallo debido a la radiación térmica por efecto domino en un área de almacenamiento de hidrocarburos. En su investigación se propone un enfoque novedoso de cinco pasos para cuantificar los efectos sinérgicos a través de las redes bayesiana dando como resultado altas probabilidades de ocurrencia del efecto dominó.

Dueñas Santana, Orozco, Furka, *et al.* (2021), proponen la integración de técnicas clásicas de análisis de riesgo con redes bayesianas, desarrollando un modelo de 4 etapas para estimar la probabilidad de ocurrencia de efecto domino sobre un área de almacenamiento de hidrocarburos. Concluyendo que las redes bayesianas constituyen una poderosa herramienta para considerar la interacción entre los posibles escenarios de accidentes.

A criterio de la autora de esta investigación, el empleo de la técnica de inteligencia artificial, redes bayesianas, para la estimación de probabilidades de ocurrencias de sucesos de efecto dominó en la industria de procesos resulta de gran utilidad para aumentar la percepción de riesgos y llevar a cabo diversas acciones que minimicen los daños inminentes que se puedan ocasionar.

1.4. Herramientas para la evaluación y estimación del impacto individual de posibles escenarios explosión

Para el desarrollo de este epígrafe se analizan las principales metodologías que permiten cuantificar el impacto individual que causan los accidentes de explosión por su efecto continuado.

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, 2021; Hedo, 2015). El resultado de un análisis cuantitativo de riesgo es comúnmente expresado mediante los términos riesgo individual y riesgo social (López, 2017; Maaskant *et al.*, 2009).

El riesgo individual es el riesgo anual de muertes o lesiones graves a las que se encuentran expuestos varios individuos específicos. Es la probabilidad de muerte de una persona promedio sin protección que está constantemente presente en un lugar determinado y que está expuesta a un peligro (Wiering *et al.*, 2015). Según Basheer *et al.* (2019) este peligro incluye la naturaleza de la lesión del individuo, la probabilidad de que ocurra la lesión y el período de tiempo durante el cual la lesión podría ocurrir.

Según Denat (2017) también puede definirse como la frecuencia esperada del daño de referencia que se produce como consecuencia de cualquier escenario de accidente considerado en el análisis, a una persona que está permanentemente presente (24 h por

día por año) en un punto determinado del área considerada, sin protección y no hay posibilidad de ser refugiado o evacuado.

El riesgo individual, por lo general, se expresa en forma de curvas de isorriesgos donde estas representan los niveles de riesgo individual en torno a la instalación analizada. Una curva de isorriesgos conecta todas las ubicaciones geográficas alrededor de una actividad peligrosa con un riesgo individual igual, es decir, todas las ubicaciones con la misma probabilidad general de letalidad (Denat, 2017; Khakzad *et al.*, 2018a) y se puede estimar para el individuo más expuesto, para grupos de individuos en lugares específicos o para un individuo promedio en una zona de efecto (Basheer *et al.*, 2019).

Generalmente se acepta que el riesgo individual no debe exceder de 1 en 10 000 en cualquier año y que el riesgo por debajo de 1 en 100 000 es insignificante en relación con otros riesgos aceptados. El riesgo individual no describe completamente situaciones en las que un solo accidente podría matar o herir a un gran número de personas (Ewing y Campbell, 1994).

Al evaluar la aceptabilidad del riesgo en los seres humanos, generalmente se consideran dos formas de medirlo, distintas y complementarias: el juicio de aceptabilidad del riesgo social e individual (Renjith y Madhu, 2010). Una evaluación holística del riesgo debe tener en cuenta, por una parte, el daño físico esperado en las infraestructuras, el número de víctimas, las pérdidas económicas y medioambientales (efectos de primer orden).

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 yMadhu, 2010).

El riesgo para un individuo según López (2017) puede expresarse por la ecuación 1.1.

$$IR_{x,y} = \sum_{i=1}^{i=n} IR_{x,y} \quad (1.1)$$

Donde:

$IR_{x,y}$: Riesgo individual total de muerte en punto geográfico x, y (probabilidad de muerte/año) bajo el escenario i.

n : Número total de escenarios considerados en el análisis.

$IR_{x,y}$ se expresa como una función de la frecuencia y la probabilidad en la ecuación 1.2.

$$IR_{x,y} = f_i * P_{fi} \quad (1.2)$$

Donde:

f_i : Frecuencia de que un escenario determinado i ocurra en año⁻¹.

P_{fi} : Probabilidad de que el escenario accidental ocasione una muerte en el escenario x, y.

La frecuencia f_i se puede obtener del producto de la frecuencia del evento inicial y de la probabilidad de que se produzca la secuencia de eventos que conducen al escenario accidental i.

El valor P_{fi} se obtiene mediante la aplicación de modelos de vulnerabilidad.

Por lo que para la determinación del riesgo individual se debe tener en cuenta la vulnerabilidad que, según González (2012) 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 *et al.* (2016) como el grado de daño a un elemento específico en riesgo para un fenómeno de peligro (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 (Nair *et al.*, 2022; Sengupta *et al.*, 2016).

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.*, 2017; Gai *et al.*, 2018). 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 (Reniers y Cozzani, 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 (Markert, 2018). 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 yMadhu, 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 yMadhu, 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 (González, 2012).

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) y de las características del terreno (López, 2017).

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.*, 2009), junto a las funciones Probit descritas anteriormente constituyen una metodología completa y extensiva en la cuantificación del riesgo individual que provocan los accidentes de explosión por su efecto continuado.

A criterio de la autora de esta investigación la forma más adecuada de cuantificar el impacto individual es a través de la confección de las curvas de isorriesgos o mapas de riesgo.

Conclusiones parciales

1. En la industria de procesos se pueden manifestar los siguientes escenarios relacionados a accidentes tóxicos y explosión: explosión tipo BLEVE y nubes tóxicas.
2. Los hornos y las calderas son de los recipientes más susceptibles en la industria química para la ocurrencia de incendio y explosiones, sobre todo del tipo BLEVE.
3. El análisis histórico de accidentes resulta indispensable en la obtención de resultados cuantitativos para evaluar el impacto social debido al efecto continuado de accidentes de incendio.
4. La secuencia del efecto dominó es más probable que se desarrolle, como máximo, hasta los posibles accidentes cuaternarios.
5. Las técnicas más empleadas para la evaluación del riesgo individual son las curvas de isorriesgos

Capítulo 2: Materiales y Métodos

En este capítulo se realiza una caracterización de la planta de ácido sulfúrico que se encuentra en la UEB Rayonitro ubicada en la zona industrial de Matanzas. Se describen las metodologías de análisis que se aplicarán y que serán utilizadas para la evaluación de los diferentes riesgos que se pueden presentar en el área por concepto de explosiones y nube tóxica de vapor.

2.1. Descripción del proceso de ácido sulfúrico

La producción de ácido sulfúrico en la UEB Rayonitro se basa en el método simple contacto-simple absorción. El azufre llega a la planta generalmente en estado sólido y se almacena en un área abierta. Para el proceso es necesario el azufre en estado líquido por lo que se vierte en el tacho de. El azufre se funde con la ayuda de serpentines de vapor en la primera sección del tacho, luego se bombea hasta la segunda sección que por ser laberíntica, favorece que durante el recorrido del azufre se sedimente hasta el 98% de sus impurezas y alcance la temperatura requerida de 120 - 150°C para llegar al horno donde ocurre la combustión. Para la combustión se utiliza el aire seco proveniente de la torre de secado, el cual es impulsado por un soplador y llega al horno con una temperatura aproximada de 50°C, donde se produce una reacción altamente exotérmica y se obtiene como producto una mezcla de gases ($\text{SO}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2$) en un rango de temperatura entre 600 - 620°C, donde el dióxido de azufre (SO_2) es el componente de interés. Al salir del horno, los gases pasan a través de la caldera, la cual tiene dos funciones, reducir la temperatura de los gases, y la producción de vapor saturado que se utiliza en el tacho.

Luego de salir de la caldera, los gases pasan a través de los filtros de gas, los cuales están instalados en paralelo y trabajan a la vez. Los filtros son mecánicos y tienen la función de impedir que llegue a la primera masa del convertidor cualquiera impureza que pudieran venir incorporadas en el flujo de gas. Luego los gases llegan al convertidor,

donde ocurre la reacción de oxidación por la que el SO_2 se convierte en SO_3 , a través de cuatro masas del catalizador de pentóxido de vanadio. El proceso de conversión genera gran cantidad de calor por lo que se debe evitar que supere los 600°C a la salida de las mismas, para lograr la mayor eficiencia y estabilidad del proceso, para esto se utilizan dos intercambiadores de calor de tubo y coraza que están situados en la parte exterior del convertidor, por donde circula aire húmedo atmosférico procedente de otro soplador. Los gases de salida del segundo intercambiador se reincorporan a la tercera masa del convertidor. El aire a la salida de la tercera masa y antes de entrar en la cuarta, se enfría el gas con aire seco a 50°C procedente de la torre de secado, el cual pasa a través del *bypass* que se encuentra a la entrada del horno. Los gases al salir del convertidor pasan a través de las dos torres enfriadoras de SO_3 , donde se transfiere parte del calor de los gases de salida al aire húmedo atmosférico procedente del segundo soplador.

Al salir de las torres enfriadoras, el gas con alto contenido de SO_3 llega a la torre. A la torre de absorción se le suministra ácido desde los tanques de procesos. El ácido absorbe el SO_3 y enriquece su concentración hasta 98,3% para luego descender por gravedad hacia los tanques de procesos norte y sur. Los gases de cola del proceso salen de la torre de absorción hacia la chimenea, desde la cual son expulsados a la atmósfera. El ácido contenido en los tanques de procesos mantiene una concentración promedio de 98-98,5%. Ambos tanques logran igualar la concentración por estar comunicados entre sí mediante una tubería. Al salir de los tanques, el ácido pasa a través de un intercambiador de calor de cascada (enfriador de ácido), al cual se le hace llegar el agua desde un tanque cercano. A la salida de los tanques, parte del ácido es bombeado a la torre de secado, que al igual que la torre de absorción, es un recipiente cilíndrico vertical con anillos cerámicos de espirales (*rasching*) en su interior. La torre de secado tiene dos objetivos fundamentales, el secado del aire atmosférico que se utilizará en el horno y la dilución del ácido de recirculación que pasa a los tanques de procesos y posteriormente se bombea a la torre de absorción. El aire húmedo atmosférico es impulsado hacia la

torre de secado por una sopladora penetrando desde abajo a contracorriente del ácido. Como resultado, se obtienen el aire seco que reduce la posibilidad de corrosión que causa el gas húmedo en los conductos de la planta; el cual sale por la parte superior del convertidor, y ácido debilitado de concentración 97,5-98% que baja por gravedad a los tanques de procesos. La otra parte del ácido enfriado que no es bombeado a la torre de secado pasa de forma regulada y constante hacia los tanques de almacenamiento, los cuales tienen una capacidad de 100 m³ (184 t) cada uno. En el anexo 3 se muestra el diagrama de flujo del proceso.

2.1.1. Caracterización del sistema horno – caldera

El horno de combustión de azufre es un equipo cilíndrico horizontal de aproximadamente 2,43 m de diámetro interior y 10 m de longitud construido de chapas de hierro y dividido en dos secciones, ambas recubiertas interiormente con ladrillos aislantes y refractarios. En la primera sección el azufre líquido reacciona con el aire inyectado por el soplador, produciéndose una llamarada continua en la boca del quemador con la formación del dióxido de azufre (SO₂) y el desprendimiento de una gran cantidad de calor. La segunda sección está unida a la primera por un codo de 180° por la parte superior y comunica directamente con la caldera.

La caldera es un equipo cilíndrico horizontal construido de chapas de hierro, situado a continuación del horno. Consta de 256 tubos de 51 mm de diámetro exterior, 3 mm de espesor y 3,5 m de longitud, por los cuales pasan los gases de combustión intercambiando su calor con agua previamente tratada que circula por el exterior. Tiene dos objetivos fundamentales, el enfriamiento de los gases de combustión que salen del horno hasta la temperatura adecuada de entrada al convertidor, y la utilización de la energía desprendida para la producción del vapor saturado, necesario para la fusión del azufre.

2.1. Caracterización del área de la instalación

Matanzas tiene 138 303 habitantes y está ubicada a 100 km de La Habana, la capital del país. Por la cercanía del Reparto Dubrock y de Versalles a la planta objeto de estudio, se decide evaluar el alcance de una nube tóxica de dióxido y trióxido de azufre en caso de una falla en el sistema horno-caldera y la vulnerabilidad de las personas para lo cual se identifican tres puntos para medir el riesgo tóxico, con respecto a la fuente de emisión. En la Tabla 2.1 se muestra la ubicación de los puntos seleccionados sus características.

Tabla 2.1: Distancia de los puntos de evaluación desde la fuente y sus características

Localización	Distancia desde la fuente en m	Nombre	Características
Fuente	0	Rayonitro	Oficinas y restaurantes para trabajadores. Máximo 45 personas presentes.
Punto 1	1650	Barrio Dubrock	Primera posible comunidad afectada, 1433 habitantes
Punto 2	2550	Barrio Versalles	Segunda posible comunidad afectada, 20 640 habitantes. Hospitales en esta zona: 3 Escuelas: 4

2.2. Definición de los escenarios y equipos afectados

Los escenarios y equipos afectados se definen teniendo en cuenta parte del análisis bibliográfico, a partir de la caracterización del área y de las propiedades de las sustancias.

2.3. Estimación del alcance de los escenarios

En este epígrafe se describe el proceso de simulación de los escenarios de accidentes tóxicos y explosión considerados en el proceso de estudio, además se establecen las

características y particularidades del programa y método empleado con este fin, para obtener así un mayor dominio y manejo del mismo.

Para la realización de las corridas en ALOHA se tiene en cuenta las variables meteorológicas según Orozco *et al.* (2019), para las direcciones de mayor frecuencia y mayor velocidad y para las temperaturas extremas de las temporadas de verano e invierno. En el anexo 4 se muestra el gráfico elaborado por Orozco *et al.* (2019) con el comportamiento de las direcciones del viento y sus respectivas velocidades en la zona donde se ubica la UEB Rayonitro.

2.3.1. Características y particularidades del software ALOHA

Para determinar el alcance y las características que presentan el escenario de nube tóxica de vapor se emplea el *software Areal Locations of Hazardous Atmospheres* (ALOHA), reconocido por el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba (CITMA) como un buen simulador de estos escenarios y cuenta con alto prestigio internacional.

ALOHA, es el acrónimo que se emplea para designar el programa de Ubicaciones Zonales de Atmósferas Peligrosas. Este se ha diseñado para emplearlo por responsables de los servicios de emergencias ante accidentes químicos, así como para la planificación y entrenamiento ante situaciones de emergencia.

El programa ALOHA emplea en sus cálculos dos modelos de dispersión: un modelo Gaussiano para gases ligeros que ascienden rápidamente, y el modelo de Degadis para gases densos que se dispersan a ras de suelo. Estos modelos predicen la velocidad de emisión de vapores químicos que escapan a la atmósfera desde tuberías rotas, fugas de tanques, charcos de líquidos tóxicos en evaporación o directamente desde cualquier otra fuente de emisión. Por lo que, ALOHA es capaz de estimar cómo una nube de gas peligrosa podría dispersarse en la atmósfera después de una descarga química accidental. Contiene una base de datos con información sobre las propiedades físicas de unos 1000 productos químicos peligrosos. Sus cálculos representan un balance entre

exactitud y velocidad, puesto que se ha diseñado para que puedan usarlo los responsables de los servicios de emergencia.

Existen seis pasos básicos e imprescindibles en la simulación con ALOHA que son:

- Indicar la ciudad, fecha y hora del accidente.
- Seleccionar el producto químico liberado.
- Introducir las condiciones meteorológicas.
- Describir la descarga del producto químico.
- Mostrar en un gráfico las zonas de peligrosidad.
- Determinar los niveles de riesgo en una ubicación específica.

ALOHA permite modelar escapes químicos de cuatro tipos y fuentes de emisión:

- Emisiones directas a la atmósfera
- Charcos o piscinas de compuestos químicos en evaporación
- Tanques
- Tuberías de gases.

ALOHA brinda como resultado la velocidad promedio de descarga durante el accidente. Se dibujan zonas de riesgo que representan el área en cuyo interior la concentración a nivel del suelo de un gas contaminante excederá del Nivel de Preocupación (LOC: *Level of concern*) seleccionado por el usuario, después de iniciarse la descarga accidental.

El nivel de preocupación (LOC) se define como el valor umbral a partir del cual se considera que los seres vivos y bienes materiales dentro de dicha zona se encuentren en peligro. Ese peligro puede ser de varios tipos: toxicidad, inflamabilidad o riesgo de incendio, radiación térmica emitida por un incendio y sobrepresión de una nube de vapor que puede causar una explosión.

Si se eligen tres niveles de preocupación, ALOHA mostrará las zonas de preocupación en tres colores: rojo, naranja y amarillo. La zona roja representa el área de mayor peligro, y las zonas naranjas y amarillas las áreas de menor peligro respectivamente.

ALOHA utiliza Niveles de Referencia de Exposición Aguda (AEGL) como los LOC predeterminados; además trae Pautas de Planificación de Respuesta de Emergencia (ERPG) que es recomendada su utilización por los expertos.

En el mapa de la Zona de Riesgo, las líneas de trazos representan la incertidumbre en la dirección del viento, y las líneas continuas alrededor de la zona sombreada representan las líneas de confianza de la dirección del viento.

Cuando se modela un escenario de dispersión de una nube tóxica, ALOHA sugiere tres valores de distancias por defecto basados en fuentes ampliamente aceptadas. El programa utiliza estos valores umbrales para crear las siguientes zonas de riesgo (Manual, 2007):

- ERPG-1: Concentración máxima en el aire por debajo de la cual casi todas las personas pueden estar expuestas durante 1 hora sin experimentar más que efectos leves y transitorios, o sin percibir un olor claramente definido.
- ERPG-2: Concentración máxima en el aire por debajo de la cual casi todas las personas pueden estar expuestas hasta 1 hora sin experimentar o desarrollar efectos o síntomas irreversibles o graves para la salud, que podrían afectar la capacidad de una persona para tomar medidas de protección.
- ERPG-3: Concentración máxima en el aire por debajo de la cual casi todas las personas pueden estar expuestas hasta 1 hora sin experimentar o desarrollar efectos que pongan en peligro la vida.

Los resultados de ALOHA pueden ser poco fiables si se dan las condiciones siguientes:

- Velocidades de viento muy bajas.

- Condiciones atmosféricas muy estables.
- Desigualdad de concentración cerca de la fuente de emisión del contaminante.
- Cambios de viento y efectos de conducción del terreno.

Además, ALOHA no tiene en cuenta los efectos de:

- Subproductos de incendios, explosiones y reacciones químicas.
- Partículas sólidas o radiactivas, los procesos de deposición seca y húmeda que les afectan.
- Mezclas de compuestos químicos, no los modela.
- Terreno, supone que el suelo es plano alrededor del accidente.
- Fragmentos peligrosos tras una explosión, no se modela su trayectoria.

2.3.2. Modelación de explosiones tipo BLEVE en la caldera

Para la estimación del escenario de explosión, se modela las explosiones de calderas considerando estas como una rotura dúctil en la que se da, en cuanto al vapor, una expansión isoentrópica a causa de la velocidad a la que se produce y que el vapor se comporta como un gas ideal. Además, se hace necesario conocer la intensidad de la sobrepresión en un punto dado.

Con este fin se emplea el método de la TNT equivalente, que se puede determinar según se describe en Casal (2021), por Bubbico yMazzarotta (2013), o por la ecuación empírica propuesta por Kinney y Graham citada por Birk *et al.* (2007); (Bubbico yMazzarotta, 2013). En esta investigación, para eliminar la dificultad de lectura de nomogramas, se determina la masa de TNT equivalente según Casal (2021).

A partir de principios termodinámicos básicos, se modela la energía de una explosión BLEVE, aplicable a calderas, el que traduce a su equivalente de TNT, a fin de calcular las sobrepresiones generadas, utilizando las correlaciones de sobrepresión y distancia escalada.

La energía liberada por una expansión isoentrópica para un gas ideal se expresa según la ecuación 2.1.

$$Ev = 10^2 * \left(\frac{P*V}{Y-1}\right) * \left(1 - \left(\frac{Pa}{P}\right)^{\frac{Y-1}{Y}}\right) \quad (2.1)$$

Donde:

Ev: Energía liberada por la expansión en kJ

P: Presión existente en el recipiente justo antes de la explosión en bar

V: Volumen inicial del vapor en m³

Pa: Presión atmosférica en bar

Y: Relación de calor específico para el vapor (*Cp/Cv*), donde:

Cp: Calor específico a presión constante en J/kgK

Cv: Calor específico a volumen constante en J/kgK

Esta energía se expresa en masa de TNT equivalente mediante la ecuación 2.2 realizando un ajuste a la ecuación 2.1 a través de un factor de conversión energético que para este caso es 1120cal/gramo de TNT:

$$W(TNT) = 0.021 * \left(\frac{P*V}{Y-1}\right) * \left(1 - \left(\frac{Pa}{P}\right)^{\frac{Y-1}{Y}}\right) \quad (2.2)$$

Donde:

W(TNT): Masa de TNT equivalente en kg

0.021: Factor que representa el ajuste a la ecuación (2.1)

Según describe Casal (2021), si el recipiente contiene además líquido sobrecalentado, como es el caso de una explosión isoentrópica, debe considerarse que la masa de líquido se vaporizará súbitamente al encontrarse a presión atmosférica y se debe calcular el volumen que ocuparía el vapor a la presión existente en el recipiente un instante antes de la explosión; añadiendo este volumen virtual al volumen de vapor real, por lo que la masa de TNT equivalente se calcula por la ecuación 2.3.

$$W(TNT) = 0.021 * \left(\frac{P*V'}{Y-1}\right) * \left(1 - \left(\frac{Pa}{P}\right)^{\frac{Y-1}{Y}}\right) \quad (2.3)$$

Donde:

V' : Volumen de vapor dentro del depósito más el volumen (a la presión del depósito) de vapor generado en la vaporización en m^3 que se calcula por la ecuación 2.4.

$$V' = V + Vl * f * \left(\frac{\rho^l}{\rho^v}\right) \quad (2.4)$$

Donde:

V : Volumen de vapor en el depósito antes de la explosión en m^3

Vl : Volumen del líquido en el recipiente antes de la explosión en m^3

$\frac{\rho^l}{\rho^v}$: Razón de densidad del líquido/densidad de vapor

f : Fracción de vaporización (*flash*), o sea, la fracción de líquido que se evapora en la despresurización. Se determina por la ecuación 2.5.

$$f = 1 - e^{\left[(-2.63 * \frac{Cp}{Hv} * (Tc - Tb))\right]} * \left[1 - \left(\frac{Tc - To}{Tc - Tb}\right)^{0.38}\right] \quad (2.5)$$

Donde:

Hv : Entalpía de vaporización en kJ/kg

C_p : Calor específico a presión constante en J/kgK

T_c : Temperatura crítica en K

T_b : Temperatura de ebullición de la sustancia a presión atmosférica en K

T_o : Temperatura a la que se encuentra la sustancia en el momento de la explosión en K

e : Constante de Euler = 2,71828

2.3.3. Cuantificación de la intensidad de sobrepresión para el escenario de explosión

El valor de la sobrepresión generada por la explosión, se estima a partir de la masa de TNT equivalente. Debido a que el volumen ocupado inicialmente por la energía que se libera en la explosión es mucho más elevado que el que ocuparía la masa equivalente de TNT, se debe realizar una corrección en la distancia desde el centro de la explosión hasta el lugar del que se quiere saber la sobrepresión. Esta corrección se lleva a cabo mediante la utilización de la distancia normalizada o escalada.

Casal (2021) sugiere que, en caso de una rotura frágil del recipiente, el 80% de la energía liberada se convierte en onda de presión, mientras que, en caso de una rotura dúctil, de la que resultan proyectadas grandes secciones del depósito, la energía de la onda de presión es sólo del 40% respecto al total.

Los materiales con los que están contruidos la mayoría de los depósitos o recipientes son dúctiles en condiciones normales de trabajo. La rotura frágil sólo se da en circunstancias especiales, cuando la tensión a la que es sometido el material es muy superior a su límite plástico, y esto sólo llega a ocurrir en el caso del acero revenido y del vidrio. Casal (2021) expone que las explosiones BLEVE suelen ser roturas dúctiles por lo que en esta investigación se utiliza un 40%. Luego, la distancia normalizada se calcula por la ecuación 2.6.

$$dn = \frac{d}{\sqrt[3]{B*W(TNT)}} \quad (2.6)$$

Donde:

dn : Distancia normalizada en $m/kg^{-1/3}$

d : Distancia (real) desde el centro de la explosión a la que se estima la sobrepresión en m

B : Fracción de la energía de la que se transforma en onda de presión = 40%

En esta investigación se emplea la ecuación empírica propuesta por Jeon *et al.* (2017) y Zareei *et al.* (2016) para calcular la sobrepresión, por la ecuación 2.7.

$$\frac{P_s}{P_a} = \frac{808 * \left[1 + \left(\frac{dn}{4,5} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{dn}{0,048} \right)^2} * \sqrt{1 + \left(\frac{dn}{0,32} \right)^2} * \sqrt{1 + \left(\frac{dn}{1,35} \right)^2}} \quad (2.7)$$

Donde:

P_a : Presión atmosférica en bar

P_s : Sobrepresión en bar

2.4. Definición de las posibles unidades secundarias

Para la definición de las posibles unidades secundarias se realiza una comparación de los diferentes vectores de escalos obtenidos con los valores umbrales, que no son más que valores mínimos de efectos a partir de los cuales se puede causar daño al equipo objetivo o simplemente producir el escalado de los accidentes (R. M. Darbra *et al.*, 2010; Reniers y Cozzani, 2013).

Específicamente el umbral de daño se interpreta como un determinado valor de un efecto físico por debajo del cual el daño de cualquier elemento del equipo se considera imposible, incluyendo los daños por fallas internas y eventos naturales.

En este el mismo daño estructural puede resultar en escenarios secundarios que tienen una gravedad muy diferente, según las características de la sustancia liberada, es decir

el daño en ausencia de un escenario secundario relevante puede no producir un escalado del evento primario. De ahí que se haya definido el umbral de escalamiento como una intensidad dada de un efecto físico por debajo del cual, aunque estructuralmente no es posible dañar el equipo secundario de interés o como valores que indican la ocurrencia de un escenario secundario que tiene el potencial de proporcionar una contribución significativa a las consecuencias generales del evento dominó (Reniers yCozzani, 2013).

En la Tabla 2.2 se muestran los valores umbrales establecidos por Reniers yCozzani (2013) que se obtienen a partir datos de accidentes pasados.

Tabla 2.2: Umbrales de escalado.

Escenario de accidente	Vector de escalado	Umbral de daño	Umbral de escalado
VCE	Sobrepresión	P>7kPa	P>22kPa

Se seleccionan como posibles unidades secundarias aquellas que de forma general presenten valores de los vectores de escalado mayores que los umbrales establecidos, al considerar todos los escenarios de accidentes estudiados, lo que se debe a que en un accidente dominó la magnitud de las consecuencias del accidente secundario son superiores a las del primario.

2.5. Cuantificación de la probabilidad de escalado del escenario de explosión

Durante el desarrollo de este epígrafe se muestra el procedimiento para la determinación de la probabilidad de escalado del escenario de explosión, además, se describe el proceso para la cuantificación de la frecuencia inicial de los accidentes; pasos que son fundamentales en la confección de las redes bayesianas.

Para determinar la probabilidad de escalado se debe determinar previamente el tiempo de falla. Este depende, en caso de escenarios de explosión de la sobrepresión. Para estas determinaciones se utiliza la metodología de Reniers yCozzani (2013).

Se calculan los valores Probit y luego, a través del *software* MATLAB, se determinan las probabilidades de escalado de los accidentes primarios con escenario explosión. En el anexo 5 se muestra la programación que se realiza en Matlab.

Para calcular los valores Probit se utiliza el modelo basado en el pico de sobrepresión estática, por la fórmula siguiente:

$$Y = -18,96 + 2,44 * \ln Ps \quad (2.8)$$

Donde:

Y: Valor Probit

Ps: Pico de sobrepresión en Pa

2.5.1. Determinación de la frecuencia del suceso inicial

El fracaso es a menudo un mejor maestro que el éxito, por lo tanto, los accidentes pasados siempre contienen una lección para aprender de ellos (Reniers yCozzani, 2013). De ahí que se incluya en la metodología a aplicar en la investigación la consulta de la bibliografía especializada para identificar el equipo donde ocurre el evento inicial. Para cuantificar la secuencia de eventos más probables a ocurrir se aplica el árbol de eventos. Los árboles de eventos son una herramienta mayor en el análisis de consecuencias (Wells, 2003). Se usan para el cálculo de probabilidades de diferentes escenarios que se han identificado durante un estudio de seguridad. Desde el suceso inicial, que generalmente es una pérdida de contención, se analizan la funcionalidad y la falla de subsistemas de seguridad, teniendo en cuenta una lógica consecuente. Esto resulta en una estructura en forma de árbol, con las ramas de izquierda a derecha.

Cuando se le asigna una probabilidad a cada rama, se puede determinar la probabilidad de cada escenario posible luego de iniciarse el evento inicial.

Las etapas en un Análisis de Árbol de Eventos (ETA) son las siguientes:

Etapa 1- Identificar el evento inicial: Usualmente, este es un evento de falla.

Etapa 2- Identificar el desarrollo del incidente: Considerando el control sobre la situación y la posible mitigación.

Etapa 3- Construir el árbol de eventos: A cada nodo de falla, los eventos alternativos que afectan materialmente el escenario y son los siguientes:

- El árbol de evento se construye de izquierda a derecha.
- A cada nodo de falla, se muestran los eventos alternativos que materialmente afectan el escenario.
- El evento que se sitúa en la rama superior es el afirmativo.

Etapa 4- Clasificar los escenarios del incidente: El árbol de evento se desarrolla hasta conocer el escenario objetivo del análisis. Puede ser razonable desarrollar el árbol hasta que se llegue a un accidente mayor.

Etapa 5- Estimar la probabilidad de cada rama en el árbol: A cada rama le corresponde una probabilidad condicional que suman 1.

Etapa 6- Cuantificar la probabilidad de los escenarios y revisar su exactitud: La frecuencia de cada escenario se determina multiplicando la frecuencia del evento inicial por las probabilidades condicionales de cada rama hasta llegar al escenario.

2.6. Metodología para la elaboración de la red bayesiana de probabilidades

La confección de las redes bayesianas permite determinar las probabilidades de ocurrencia de accidentes en los diferentes equipos, principalmente en aquellos que constituyen grandes peligros dentro del proceso. En este epígrafe se describe la metodología a seguir, así como las características del *software* empleado para su elaboración.

Las redes Bayesianas son representaciones gráficas 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 (Ahmadi *et al.*, 2020; Khakzad, 2021; Rehman *et al.*, 2018).

Para la elaboración de la red bayesiana de probabilidades se sigue la metodología propuesta por Reniers yCozzani (2013), la cual se muestra en la Figura 2.1.

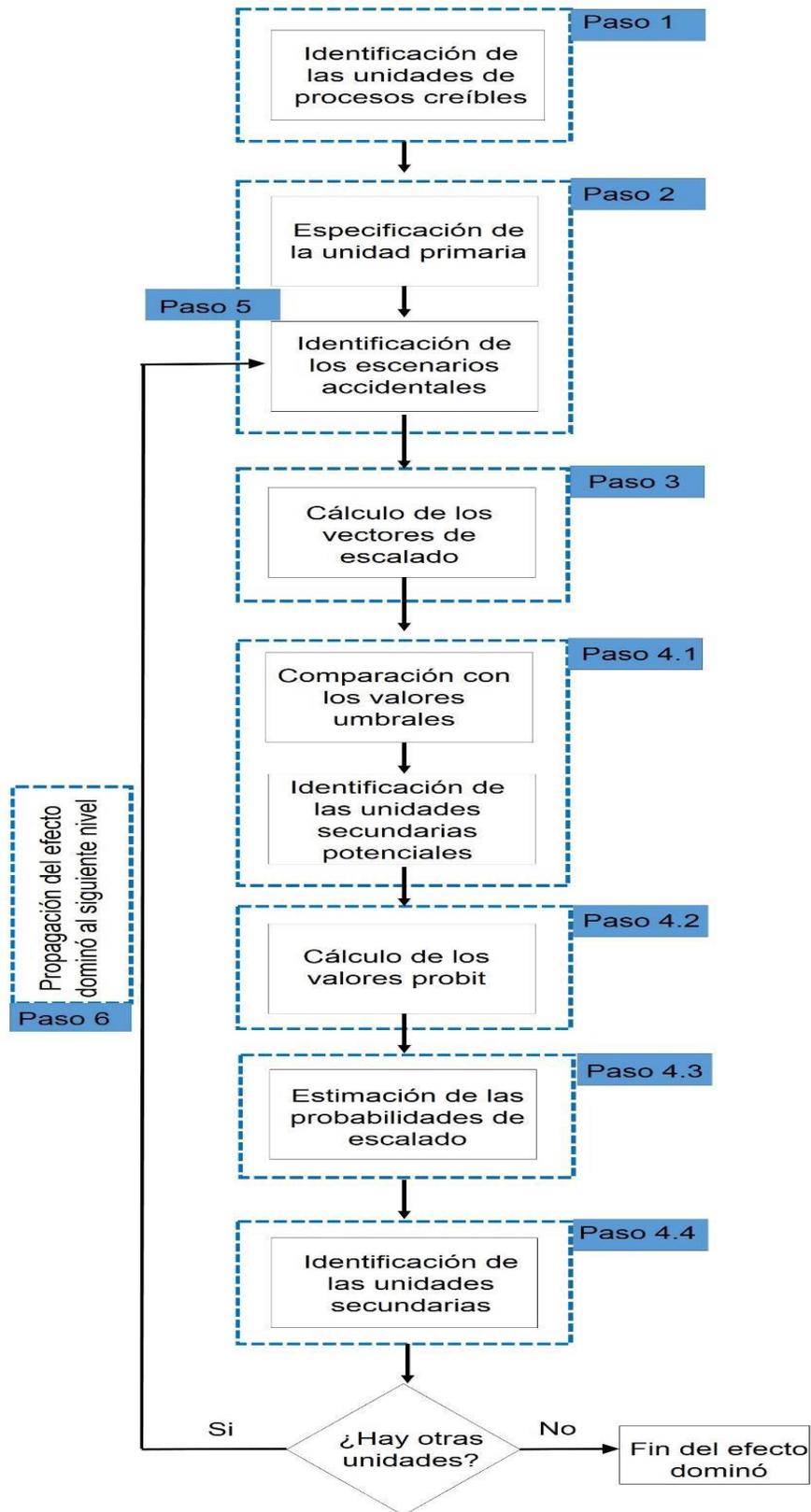


Figura 2.1: Metodología para la realización de las redes bayesianas

Para modelar el patrón de propagación probable de un efecto dominó, se llevan a cabo los siguientes pasos:

1. De acuerdo con el diseño de la planta de proceso de interés, se asigna un nodo a cada unidad de proceso. Estas unidades son susceptibles al accidente o son capaces de intensificando.
2. Se especifica la unidad primaria potencial donde es probable que comience el accidente dominó. Este paso es el equivalente al paso 1 en la figura 2.1.
3. Se evalúan los vectores de escalado en dependencia de los resultados finales que pueden seguir al escenario primario entre ellos: radiación, onda expansiva o proyección de fragmentos.
4. Se identifican las unidades secundarias potenciales al comparar los vectores de escalado con los valores umbrales (Paso 4). En la siguiente fase (4.2) se seleccionan los modelos de daño probabilísticos y cuando es necesario se deducen los valores Probit. Se calculan la probabilidad de escalado de unidades secundarias potenciales dado el evento primario y se eligen como unidades secundarias aquellas con mayor valor de probabilidad mediante los pasos 4.3 y 4.4 respectivamente. Las unidades se relacionan con un arco causal lo que se debe a que los eventos secundarios son causados por el evento primario.
5. Se especifican los escenarios y probabilidades de ocurrencia de accidentes para las unidades secundarias.
6. Para determinar otras unidades potenciales (en caso que existan), se repiten los pasos del 3 al 5 sustituyendo las unidades secundarias por la unidad primaria. En este procedimiento se deben considerar los efectos sinérgicos.

2.6.1. Características y particularidades del software Hugin

Una red Bayesiana es realmente una representación inteligente de un dominio de variables aleatorias dependientes, su simulación puede realizarse mediante el *software* Hugin cuya interfaz gráfica es una herramienta interactiva que le permite al usuario utilizar las funciones del motor de decisión para construir modelos que se pueden usar en variadas aplicaciones (Hugin, 2019). En este programa se construyen diagramas de influencia que son redes Bayesianas extendidas con nodos de decisión y funciones de utilidad. Además, la inferencia en una red Bayesiana significa calcular la probabilidad condicional de algunas variables, dada la información (evidencia) de otras variables. La inferencia de Hugin es esencialmente una aplicación inteligente del Teorema de Bayes (Dueñas Santana, Orozco, Febles Lantigua, *et al.*, 2021; Rehman *et al.*, 2018).

2.6.2. Cálculo de la probabilidad conjunta de la cadena de sucesos dominó

A partir de la elaboración de las redes bayesianas, se determina la probabilidad conjunta del efecto dominó para cada unidad de proceso primaria analizada. Además, se calculan las probabilidades de ocurrencia del efecto dominó para cada nivel de propagación. Para ello, se introducen en la red bayesiana los nodos auxiliares siguientes:

L_i : Probabilidad de propagación del accidente primario a las posibles i ésimas unidades.

$P(DL_i)$: Probabilidad del efecto dominó del nivel i ésimo.

Estos nodos se introducen a partir de las tablas de probabilidad que se muestran en las tablas 2.3 y 2.4.

Las tablas de probabilidades de los nodos auxiliares L_i se elaboran teniendo en cuenta que para considerar el efecto dominó, se necesita que exista una unidad secundaria, sea cual sea esta; mientras que, la de los nodos D_{L_i} se construyen a partir del criterio de que tiene que ocurrir un accidente en una unidad primaria (X_1) y otro en alguna otra unidad considerada entonces, secundaria.

Tabla 2.3: Tablas de probabilidades para definir los nodos L_i

Unidades íesimas		P($L_i / X_{i1}, X_{i2}$)	
X_{i1}	X_{i2}	Accidente	Seguro
Accidente	Accidente	1	0
Accidente	Seguro	1	0
Seguro	Accidente	1	0
Seguro	Seguro	0	1

Tabla 2.4: Tablas de probabilidades para definir los nodos D_{Li}

Nodos		P($D_{Li} / X_{i1}, L_i$)	
X_{i1}	X_{i2}	Accidente	Seguro
Accidente	Accidente	1	0
Accidente	Seguro	0	1
Seguro	Accidente	0	1
Seguro	Seguro	0	1

La probabilidad conjunta del efecto dominó (P_{DE}) hasta el último nivel de escalado (n), se determina por la ecuación 2.9.

$$PDE = \sum_{i=1}^n DL_i \quad (2.9)$$

2.7. Metodología para la cuantificación del riesgo individual y social

Los dos índices más significativos utilizados para evaluar el riesgo industrial son el riesgo individual y el riesgo social (expresado por las curvas R – N). El riesgo individual correspondiente a cada escenario de dominó se calcula a partir de la ecuación 2.10.

$$Ride^{(k,m)} = fde^{(k,m)} * Vde^{(k,m)} \quad (2.10)$$

Donde:

$Ride^{(k,m)}$: Riesgo individual

$fde^{(k,m)}$: Probabilidad de efecto dominó

$Vde^{(k,m)}$: Vulnerabilidad debido al efecto dominó

La vulnerabilidad se determina como la suma de la probabilidad de muerte de todos los escenarios dentro de la secuencia dominó, con un límite superior de 1, como se muestra en la ecuación 2.11.

$$Vde^{(k,m)} = \min[(Vp + \sum_{i=1}^n \delta(i, J_m^k) * V_{dj}) 1] \quad (2.11)$$

Se emplean para determinar la vulnerabilidad de las personas las ecuaciones Probit Y, expuestas por Less (2012). Para el cálculo de los efectos por sobrepresión (incluido la rotura de tímpanos), se utiliza la ecuación 2.12, recogidas en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5: Ecuación para determinar la vulnerabilidad de las personas por sobrepresión.

Efectos	Ecuaciones	Número de ecuación	de Terminología
Sobrepresión	$Y = 5,3 + 1,37 * \ln(Ps)$	2.12	P_s : Sobrepresión en bar

Luego de conocer la vulnerabilidad se procede a conocer el riesgo individual por la ecuación 2.10, posteriormente se construyen las curvas de isorriesgos.

Capítulo 3: Análisis de resultados

En este capítulo se muestran y se analizan los resultados que se obtienen de la aplicación de las técnicas de análisis de riesgo en la UEB Rayonitro por posibles fallos en el sistema horno - caldera. Primeramente, se muestran los resultados referidos al alcance de los escenarios según las corridas del *software* ALOHA. Luego, se explican los resultados de la cuantificación de la intensidad de sobrepresión para el escenario de explosión. Se determina la probabilidad conjunta a partir de redes bayesianas. Finalmente, se analizan los mapas de isorriesgos para la evaluación del impacto individual.

3.1. Análisis de los resultados del *software* ALOHA

Las simulaciones realizadas en el *software* ALOHA, se realizan con el objetivo de obtenerlos diferentes valores de alcance y concentración que tiene el accidente nube tóxica de vapor a través del radio de acción.

El empleo del *software* se realiza en el sistema horno-caldera y la torre de absorción. El sistema horno-caldera maneja, además de agua y vapor, gases donde predomina el dióxido de azufre y en el caso de la torre de absorción se analiza el trióxido de azufre. En dependencia de las sustancias que están presentes, de las condiciones de operación y de las características tecnológicas de los equipos, serán los posibles escenarios de accidentes que se puedan efectuar.

El escenario nube tóxica se analiza para las direcciones este y estenordeste ya que son la de mayor frecuencia y mayor velocidad respectivamente, y para las temperaturas de 15°C y 31°C según el estudio realizado por Orozco *et al.* (2019).

3.1.1. Estimación del alcance del escenario nube tóxica de vapor para el sistema horno-caldera.

Uno de los escenarios de accidentes que representa un gran peligro para la vida humana y el medio ambiente lo constituye la formación y propagación de una nube tóxica, pues además del alcance que puede llegar a tener, sus efectos pueden ser severos (Gai *et*

al., 2018). Por lo que en la planta objeto de estudio también se analiza este fenómeno, específicamente en aquellas unidades potenciales que contienen el dióxido y trióxido de azufre.

El peor escenario en el sistema horno-caldera, se da con la velocidad mínima del viento para la dirección este-nordeste y para la mayor temperatura del aire pues es donde la nube tóxica de dióxido de azufre alcanza una mayor distancia desde la fuente de emisión hacia los puntos analizados (Tabla 2.1), como se muestra en la Tabla A6.1. La propagación que puede llegar a tener la formación de una nube tóxica para este escenario, además de la correspondencia entre su concentración y la distancia sobre los puntos 1 y 2, se muestra en la Figura 3.1.

En esta Figura, las tres áreas representadas (indicadas por diferentes colores) son la zona geográfica en que la concentración de dióxido de azufre supera el valor establecido para cada nivel de preocupación en las zonas de riesgo, propuestos por Jones *et al.* (2013). Las líneas negras muestran el área probablemente afectada teniendo en cuenta las estadísticas de variación. El eje X indica la distancia desde la fuente y el eje Y el ancho de la nube.

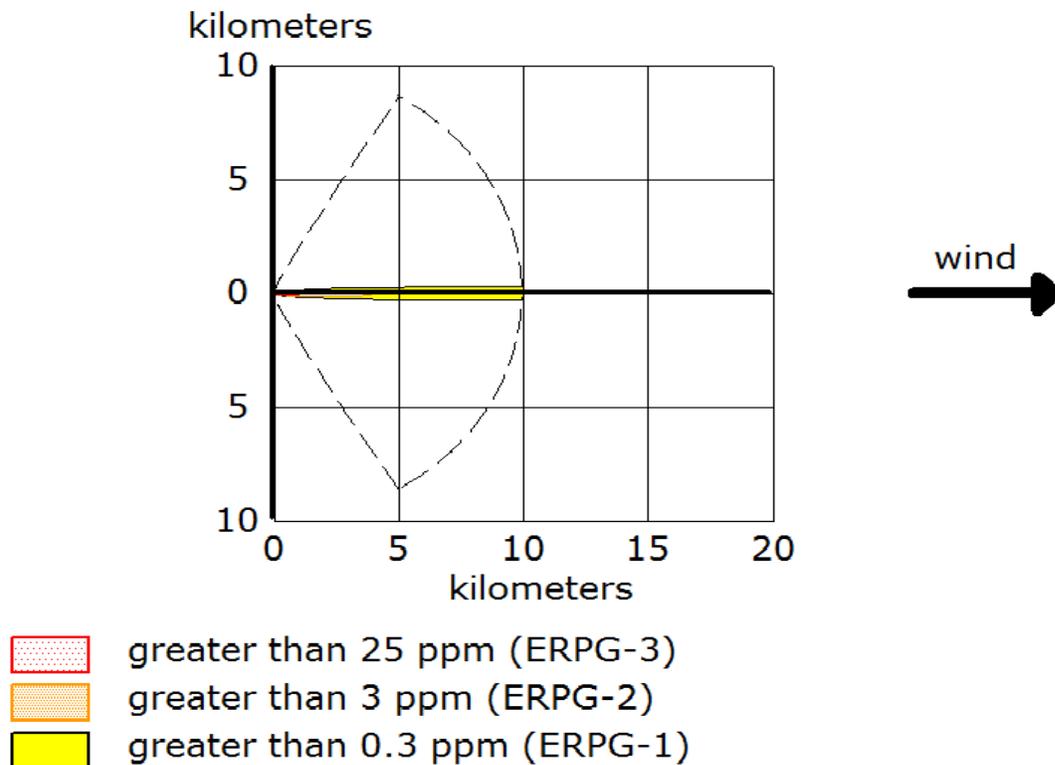


Figura3.1: Zonas de amenazas de la nube tóxica del dióxido de azufre

La Figura 3.1 evidencia el alcance que puede tener la ocurrencia de una nube tóxica de vapor en el sistema horno-caldera, envolviendo la empresa en su totalidad con la zona roja de preocupación, donde esta franja que permite valores mayores 25 ppm se logra para 1 km, lo que implica el nivel de preocupación ERPG-3 donde a este nivel las personas pueden estar expuestas hasta 1 hora sin experimentar o desarrollar efectos potencialmente mortales para la salud. La franja naranja con valores de 3 ppm que equivale a ERPG-2 oscila alrededor de 4,1 km, lo que puede provocar efectos o síntomas irreversibles adversos para la salud, mientras que la amarilla que permite una concentración superior a 0,3 ppm (ERPG-1) alcanza una distancia mayor de 10 km, provocando efectos leves o transitorios en las personas sin percibir un olor claramente definido.

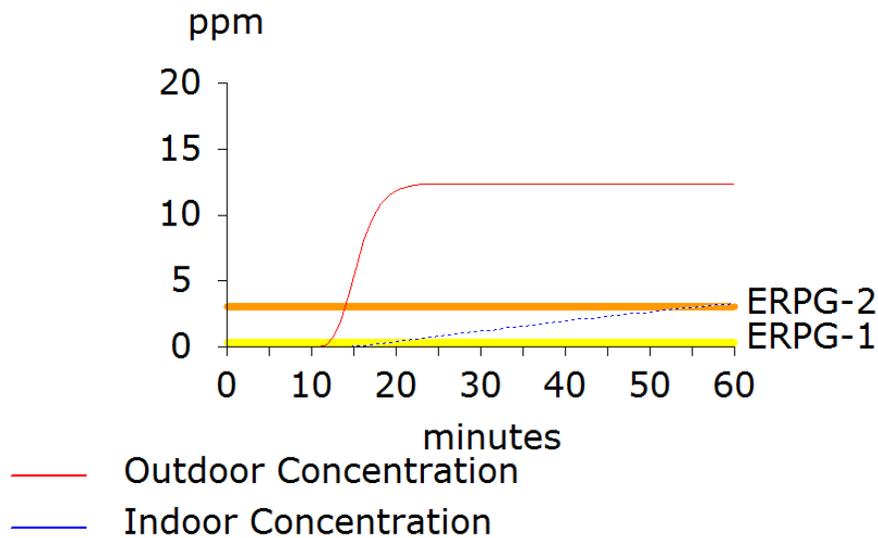
En la Figura 3.2 se muestra la propagación de la nube tóxica de dióxido de azufre en el mapa satelital. Para realizar esta imagen se utiliza el programa Marplot.



Figura 3.2: Propagación de la nube tóxica de dióxido de azufre

La Figura 3.2 muestra el comportamiento que presenta la nube tóxica para un escape dióxido de azufre. La probabilidad de afectación teniendo en cuenta la variación es amplia.

El *software* ALOHA, también permite establecer planes de contingencia para la población afectada, y pronostica los niveles de exposición en el área afectada. La concentración se puede estimar en cualquier punto del territorio afectado por la nube tóxica. En las Figuras 3.3a y 3.3b se muestra el comportamiento de la concentración para las dos zonas de análisis desde la fuente de emisión (Tabla 2.1). Para ambas figuras, la línea azul punteada es la concentración de la sustancia tóxica dentro de los edificios; la línea roja continua es la concentración al aire libre, los niveles ERPG 1, 2 y 3 se indican utilizando (amarillo, naranja y rojo) líneas.



At Point: Downwind: 1650 meters Off Centerline: 0 meters

Figura 3.3a: Comportamiento de la concentración en el interior de la planta a 1650 metros de la fuente (Punto 1 de la tabla 2.1)

La Figura 3.3a corresponde al punto 1 ubicado a 1650 metros de la emisión. Aunque este punto se encuentra fuera de la zona roja de emisión, a partir de los 15 minutos aproximadamente, el incidente provoca una concentración en el interior de los edificios superior a ERPG-1 (0,3ppm) y a partir de los 55 minutos supera a ERPG-2 (3ppm), lo que apunta a un desarrollo de síntomas irreversibles para las personas. A partir de los 18 minutos del accidente se evidencia como es probable una concentración máxima en el exterior de 13 ppm aproximadamente, haciéndose estable a partir de los 20 minutos, lo que causaría efectos dañinos para la vista y la piel de las personas, esta concentración es un valor mucho mayor de 5ppm que es lo establecido para un tiempo corto de 15 minutos, según Less (2012).

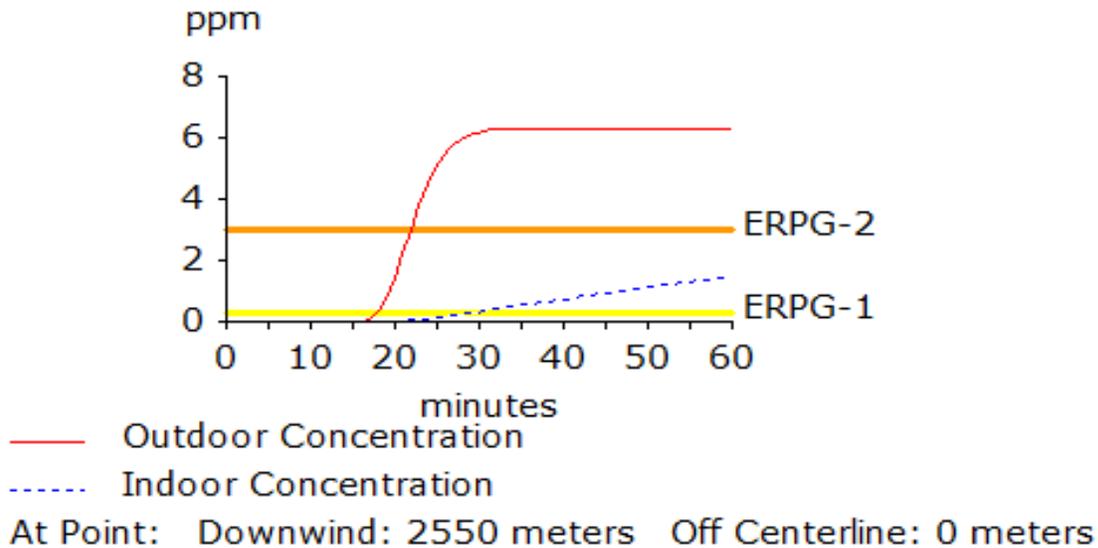


Figura 3.3b: Comportamiento de la concentración en el interior de la planta a 2550 metros de la fuente (Punto 2 de la tabla 2.1)

El punto 2 de la Tabla 2.1 (Figura 3.3b) se encuentra a 2550 metros de la fuente. Aunque este punto también se encuentra fuera de la zona roja de emisión, la situación es distinta a la del punto 1: dentro de los edificios, la concentración de dióxido de azufre supera el ERPG-1 (0,3ppm) a partir de los 20 minutos y dentro de los 60 minutos que analiza el *software* no alcanza el ERPG-2 (3ppm). Para el exterior, la concentración máxima se alcanza casi 25 minutos después del accidente y haciéndose estable a partir de los 30 minutos, con aproximadamente 6 ppm, no muy lejos de lo establecido por Less (2012) y por debajo de lo analizado en el punto 1.

Al comparar ambas figuras se aprecia que en el punto 1 se alcanza en menor tiempo una mayor concentración de la sustancia con respecto al punto 2, debido a la cercanía de esta con la fuente de emisión. A pesar de esto el tiempo que se alcanza la concentración máxima en el punto 2 es relativamente corto por lo que se debe actuar con inmediatez para evitar efectos dañinos sobre las personas que habitan en la zona.

3.1.2. Estimación del alcance del escenario nube tóxica de vapor por accidente en la torre de absorción

En la torre de absorción el agua contenida en el ácido sulfúrico suministrado reacciona con el trióxido de azufre. Las corridas en ALOHA se analizan para el trióxido de azufre y el peor escenario se da para la menor temperatura del aire, con la condición de velocidad mínima del viento en dirección este como se muestra en la Tabla A6.2.

En la Figura 3.4 se muestra el gráfico de zonas de amenaza de la nube de trióxido de azufre en caso de una liberación accidental.

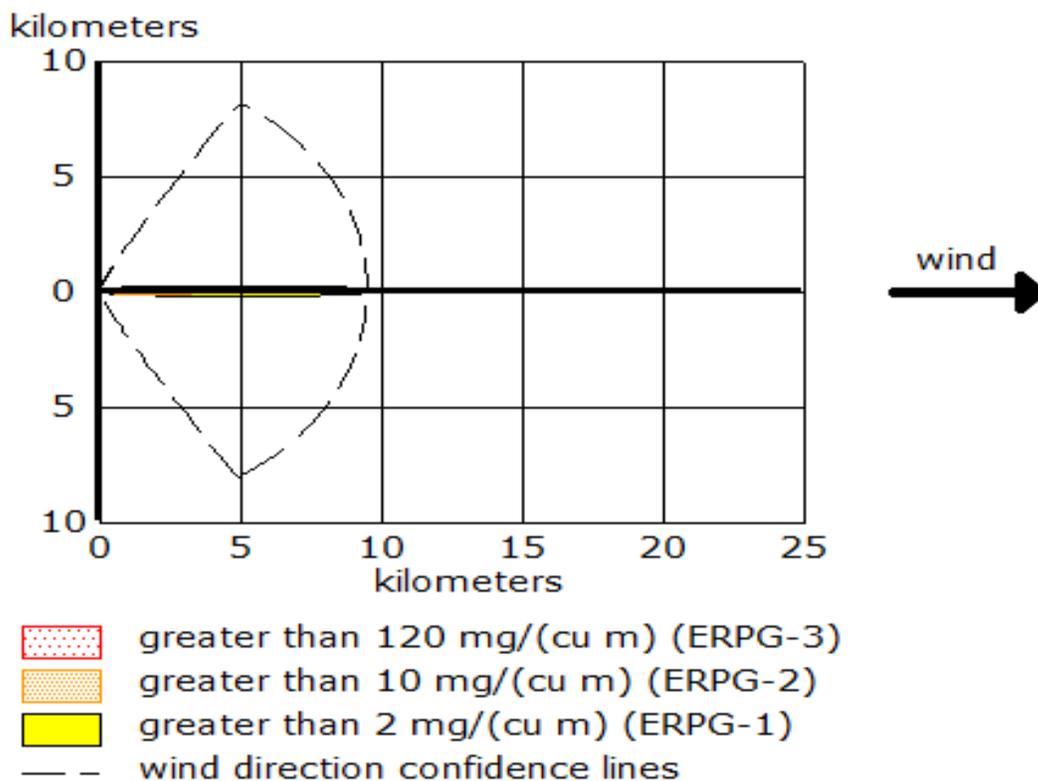


Figura 3.4: Zonas de amenaza de la nube de trióxido de azufre

La zona roja muestra las concentraciones esperadas iguales o por encima de $120\text{mg}/\text{m}^3$ ($36,7\text{ppm}$), (ERPG-3), que se alcanza a los 762 metros aproximadamente. En el área naranja, la concentración de trióxido de azufre excede a $10\text{mg}/\text{m}^3$ ($3,06\text{ppm}$) y abarca los 3,8 kilómetros, que se corresponde con el nivel ERPG-2. En la zona amarilla, la concentración de trióxido de azufre está por encima de $2\text{mg}/\text{m}^3$ ($0,61\text{ppm}$), que es el nivel ERPG-1 y no sobrepasa los 9,6 kilómetros.

Según NC-TS:803 (2010) un umbral de olor de 0,12 ppm de trióxido de azufre causa irritación en las vías respiratorias y como se aprecia en la Figura 3.4 esta concentración se supera notablemente en los tres niveles de preocupación siendo un peligro potencial para todas las personas que se encuentren del radio que estos alcanzan.

Como en el sistema horno-caldera, para la torre de absorción se muestran dos Figuras (3.5a y 3.5b), con el comportamiento de la concentración para las dos zonas de análisis desde la fuente de emisión (Tabla 2.1).

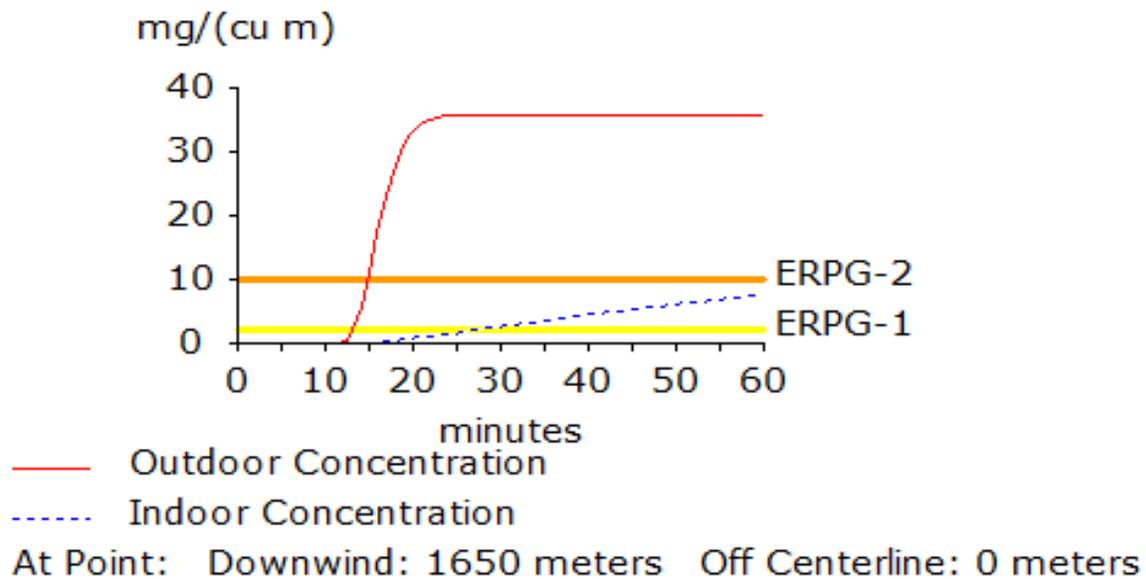


Figura 3.5a: Comportamiento de la concentración en el interior de la planta a 1650 metros de la fuente (Punto 1 de la tabla 2.1)

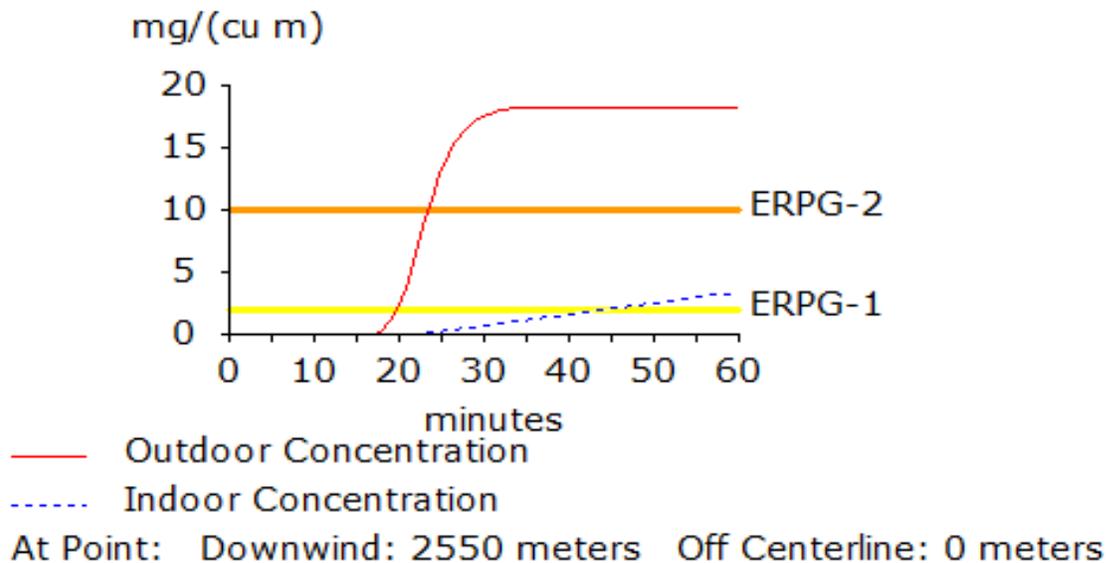


Figura 3.5b: Comportamiento de la concentración en el interior de la planta a 2550 metros de la fuente (Punto 2 de la tabla 2.1)

La Figura 3.5a corresponde al punto 1 ubicado a 1650 metros de la emisión. Aunque este punto se encuentra fuera de la zona roja de emisión a partir de los 25 minutos el incidente provoca una concentración en el interior de los edificios superior a ERPG-1 (0,61ppm) lo que puede provocar efectos leves y transitorios para los habitantes de esta zona. A partir de los 20 minutos del accidente se evidencia como es probable una concentración máxima en el exterior de aproximadamente 35 mg/m^3 (10,67 ppm) lo que provoca efectos al sistema pulmonar que pueden llegar hasta la aparición de un edema pulmonar, ya que esta supera la concentración más baja publicada para inhalación según NC-TS:803 (2010) que es de 0,03 ppm. Por otra parte, el umbral de olor no se alcanza hasta las 0,1 ppm por lo que a 10,67 ppm se hace perceptible causando irritación en las vías respiratorias.

El punto 2 de la Tabla 2.1 (Figura 3.5b) se encuentra a 2550 metros de la fuente. Aunque este punto también se encuentra fuera de la zona roja de emisión, la situación es distinta a la del punto 1: dentro de los edificios, la concentración de dióxido de azufre supera el ERPG-1 (0,61ppm) a partir de los 45 minutos. Para el exterior, la concentración máxima

se alcanza casi 25 minutos después del accidente con aproximadamente 18 mg/m^3 (5,5ppm).

Tanto para un accidente en el sistema horno-caldera como en la torre de absorción, se demuestra el grado de afectación de la nube tóxica en las zonas aledañas de la planta donde las concentraciones máximas al aire libre de las sustancias que se analizan se alcanzan en muy poco tiempo.

3.2. Estimación del alcance del escenario explosión por el método de la TNT equivalente

El método de la TNT equivalente es una opción sencilla y económica, con relación a los modelos computacionales de dinámica de fluido o modelos numéricos para simulación de edificios. La autora de esta investigación coincide con el criterio de Sochet (2010), que estos últimos modelos requieren mayores capacidades de equipo de computación y tiempo-máquina.

Para estimar el alcance del escenario de explosión se calcula el valor de la masa de TNT equivalente por la ecuación 2.3, dando un valor de 358,68 kg de TNT. Con este valor y con la distancia normalizada calculada por la ecuación 2.6, se calcula el valor de sobrepresión por la ecuación 2.7, generada por la onda expansiva desde el evento inicial (sistema horno-caldera), hasta cada equipo analizado, para este caso: Enfriador (25 metros desde la fuente), Convertidor (30 metros desde la fuente), Torre de absorción (31 metros desde la fuente) y Tanque de ácido (45 metros desde la fuente). En la Figura 3.6 se muestra la relación de sobrepresión generada con respecto a la distancia y en la Tabla 3.3 se los daños esperados para valores de sobrepresión en bar según Less (2012).

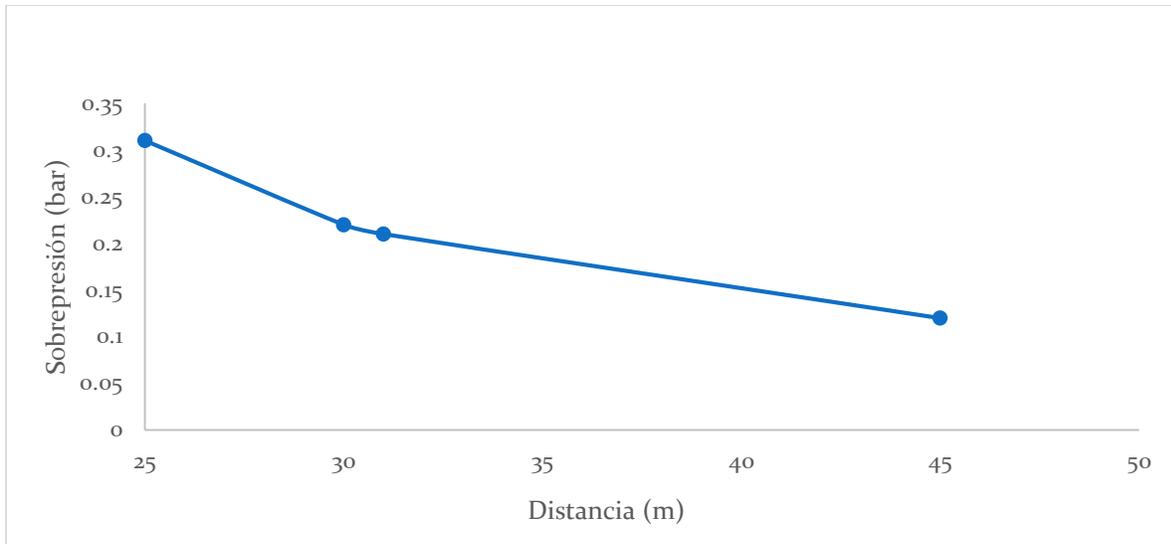


Figura 3.6: Valores de sobrepresión vs distancia real

Tabla 3.1: Daños esperados según la sobrepresión

Daños esperados	Sobrepresión (bar)
Ruido fuerte (143 db), "boom sónico", ruptura de vidrios	0,0028
Presión típica para ruptura de vidrios	0,0103
Ventanas generalmente rotas, algún daño a marcos de ventanas	0,0345-0,0690
Daño menor a estructuras domésticas	0,0483
Demolición parcial de casas; tornándolas inhabitables	0,0690
Paneles metálicos corrugados fallan y se tuercen, Paneles de madera en casas son derribados	0,0690-0,1379
Rango para heridas por laceración, de leves a serias, por vidrio volante y otros proyectiles	0,0690-0,5517
Colapso parcial de paredes y techos de casas	0,1379
Concreto no reforzado o paredes de ladrillo se rompen	0,1379-0,2069
Rango para probabilidad del 1 al 90 % de ruptura de tímpanos en poblaciones expuestas	0,1655-0,8414
50 % destrucción de paredes de ladrillo en casas	0,1724

Marcos de acero en edificios sufren distorsión y son separados de su fundación	0,2069
Postes de madera rotos,	0,3448
Casi completa destrucción de casas	0,3448-0,4828
Vuelco de vagones de tren cargados	0,4828
Demolición de vagones de carga en trenes	0,6207
Probable destrucción total de edificios	0,6897
1-99 % de fatalidades (muertes) en poblaciones expuestas por efectos directos de la explosión	1,0-2,0

Según Less (2012) (Tabla 3.1) y a partir de los valores de la Figura 3.6 se evidencia que en toda el área de la planta se escuchará un ruido fuerte y se romperá los vidrios, debido a que para las distancias analizadas desde el sistema horno caldera, los valores de sobrepresión sobrepasa en gran medida a los límites establecidos. Se romperán ventanas, se demolerá los almacenes y naves desocupadas. Habrá un colapso parcial de paredes y techos en el área comprendida del sistema horno-caldera hasta la torre de absorción. Para el caso de las personas que se puedan encontrar dentro del área pueden presentar heridas por laceración, por vidrios volantes y otros proyectiles, además que presentan una probabilidad de hasta 90% de roturas de tímpanos.

Ibrahim *et al.* (2019) utilizando modelos computaciones, concluye que al aumentar la distancia del cuarto de calderas, a partir de 2 metros y hasta 6 metros de otros edificios, produce una reducción significativa (47 % de reducción) en la sobrepresión sobre la fachada afectada, así como una reducción de la velocidad de la explosión en un 76 %, lo que representa un criterio de diseño de interés para proyectistas. Indica además que 6 metros es la distancia usualmente a cumplir en la normativa egipcia entre el cuarto de calderas y el edificio de planta más cercano. Evidentemente la planta cumple con estos requisitos, pero aun así los daños por sobrepresión son significativos.

En el caso del personal expuesto por trabajo permanente o frecuente en el sistema horno-caldera, en una distancia inferior a los 5 metros de la caldera, podría generarse daño grave o mortal, siendo en este radio la sobrepresión superior a 1 bar, por lo que la

permanencia del operador para otras funciones en este radio (ej. operación de equipo de tratamiento de aguas, análisis de agua de caldera, toma de datos, vigilancia de equipos, etc.) debe evitarse o minimizarse.

Es importante anotar que toda modificación constructiva que limite el posible efecto rebote de la presión contra las paredes, contribuiría a disminuir la sobrepresión hacia los sitios o personas expuestas, como por ejemplo la construcción de techos livianos, paredes livianas, o paredes con aberturas de ventilación, como demostraron Ibrahim *et al.* (2019).

3.3. Resultados referidos a la probabilidad de escalado y de accidente del escenario de explosión

Debido a que la empresa UEB Rayonitro no posee un registro de análisis histórico de accidentes, para la determinación de la frecuencia inicial en el sistema horno-caldera se toma como referencia a Morales-Vargas (2020), luego se aplica el árbol de eventos para cuantificar la probabilidad de escalado.

3.3.1. Determinación de la frecuencia inicial de los accidentes

Morales-Vargas (2020) indica que los fallos en calderas tienen una frecuencia de 0,9 fallos/años, según datos recolectados para los últimos 10 años lo que genera limitaciones a la fiabilidad y seguridad de la operación en la empresa.

Con el valor de frecuencia se construye el árbol de evento que se muestra en la Figura 3.7.

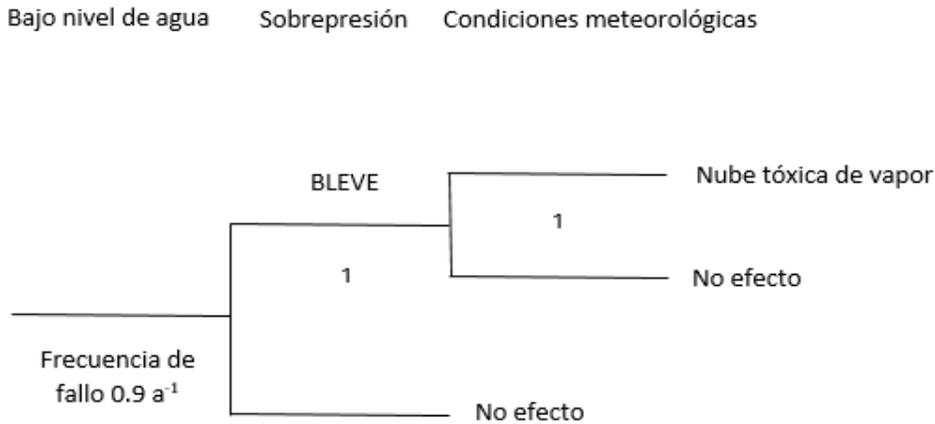


Figura 3.7: Árbol de evento para fallo en el sistema horno-caldera

A partir de la aplicación de esta técnica de análisis de riesgo, se cuantifica la probabilidad del suceso inicial explosión con magnitud frecuencial, ya que se parte de la frecuencia inicial del fallo en el sistema horno-caldera. La probabilidad de ocurrencia de una explosión tipo BLEVE, como se muestra en la Figura 3.7 es igual a la frecuencia de fallo inicial debido a que no existe posibilidad de ocurrencia de otro escenario, a su vez el escenario nube tóxica tiene una probabilidad de fallo igual a la del escenario de explosión tipo BLEVE por iguales motivos.

3.3.2. Cuantificación de la probabilidad de escalado del accidente explosión

Luego de conocer los valores de sobrepresión para cada distancia analizada se procede a obtener la probabilidad de escalado del escenario explosión. Con este propósito se emplea la ecuación Probit 2.8 y el *software* Matlab que permite obtener el valor de la probabilidad.

Tabla 3.2: Valores de sobrepresión, Probit y probabilidades de ocurrencia de efecto dominó

Equipos	Distancia real (d), en m	Distancia normalizada (dn), en $m/kg^{-1/3}$	Sobrepresión en bar	Valor Probit	Probabilidades
Enfriador	25	4,77	0,31	6,30	0,90
Convertidor	29	5,53	0,24	5,51	0,69
Torre de absorción	30	5,73	0,22	5,37	0,64
Tanque de ácido	45	8,59	0,12	3,97	0,15

Los resultados de la Tabla 3.2 demuestran que en caso de ocurrencia de una explosión en el sistema-horno caldera el equipo con mayor afectación es el enfriador que se encuentra solo a 25 metros de la fuente, no siendo así para el tanque de ácido que tiene una probabilidad muy baja y el valor de sobrepresión generado no alcanza el valor de umbral establecido por Reniers y Cozzani (2013).

3.4. Resultado y análisis de la red bayesiana desarrollada

Las redes bayesianas se construyen con la finalidad de cuantificar el valor de la probabilidad conjunta de la cadena de sucesos dominó, teniendo en cuenta los efectos sinérgicos de los escenarios que se pueden producir. Para ello, se emplea el *software* Hugin.

La red bayesiana construida a partir de un accidente primario en el sistema horno-caldera, se muestra en la Figura 3.8.

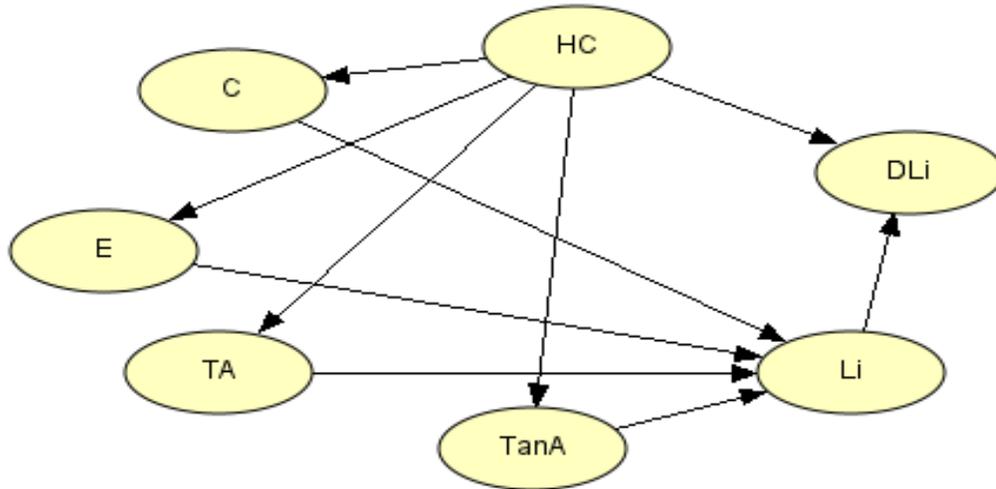


Figura 3.8: Red bayesiana de probabilidades para el sistema horno-caldera

Las unidades secundarias se toman teniendo en cuenta los valores umbrales de cada vector de escalado y esto, a su vez, depende de la distancia entre los equipos.

En la Figura 3.9 se muestran los resultados de probabilidad previa de ocurrencia de los accidentes a partir de la simulación de la red bayesiana en el *software* Hugin.

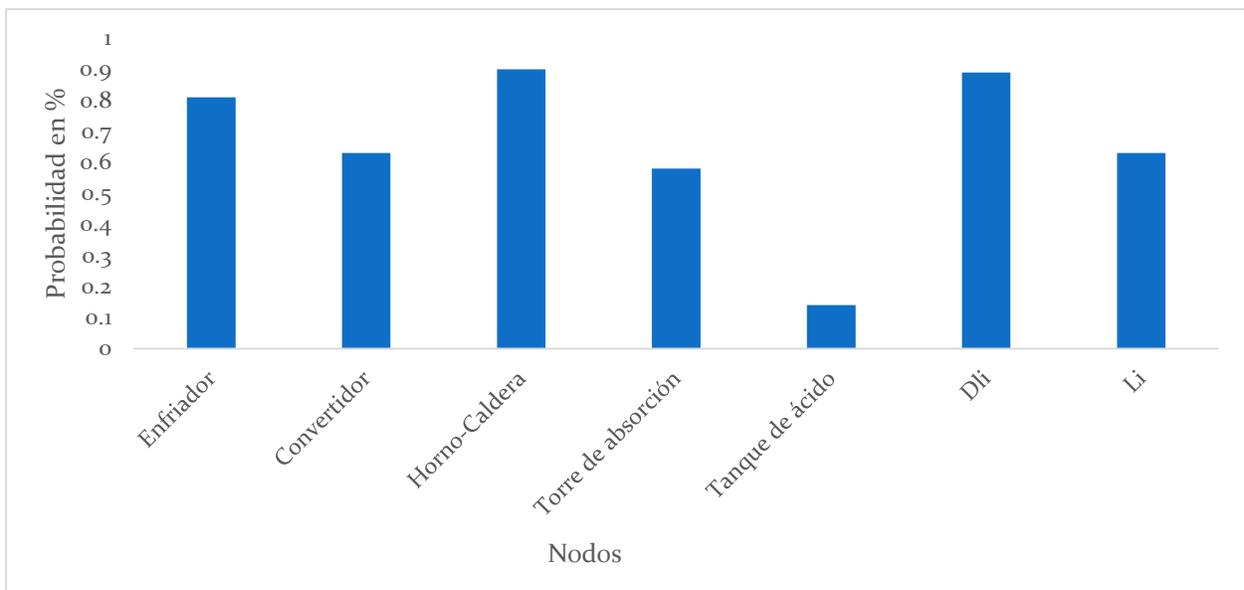


Figura 3.9: Nodos vs probabilidad previa de accidentes para red bayesianas en el sistema horno caldera

La probabilidad previa de accidente para todas las unidades de procesos no sobrepasa el 1% en ninguno de los casos. Esto significa que, a pesar de ser el sistema horno-caldera una unidad primaria potencial, el desarrollo de la secuencia dentro del efecto dominó es de muy baja probabilidad.

La probabilidad del efecto dominó (DLi) al primer nivel es de 0,89%, esto confirma que la idea de que el escalado en el sistema horno-caldera a partir de los valores de probabilidades de escalado por sobrepresión es poco probable.

Cuando ocurre un accidente con 100% de probabilidad de explosión del sistema horno-caldera, la red bayesiana de probabilidad muestra los datos que se reflejan en la Figura 3.10.

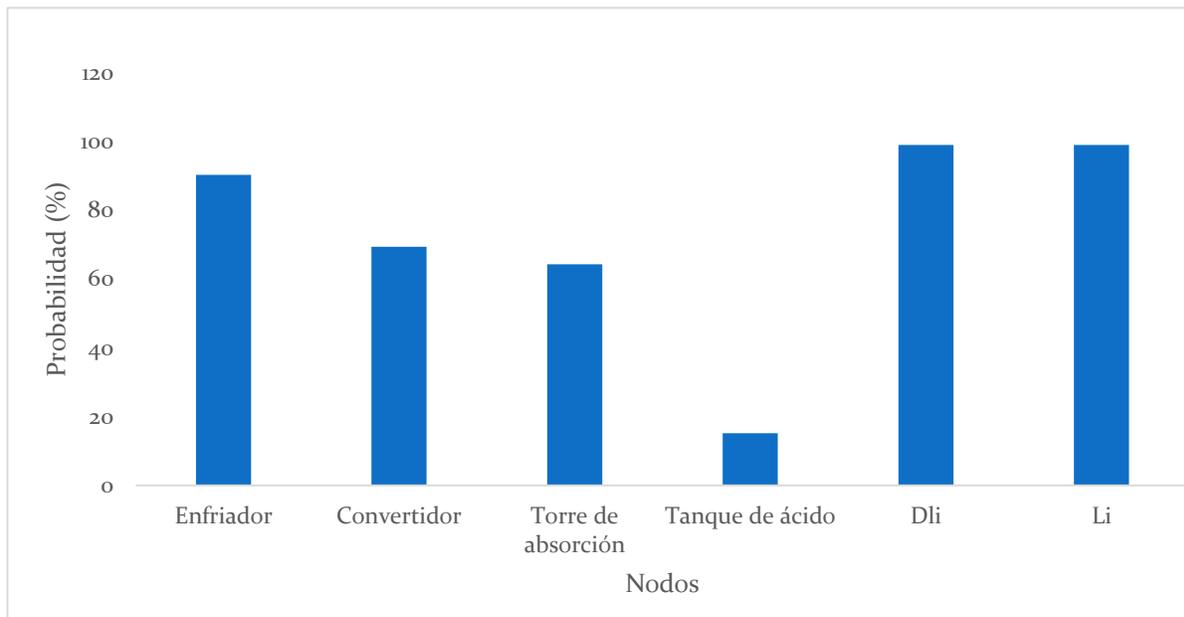


Figura 3.10: Nodos vs probabilidad de efecto dominó cuando ocurre la explosión en el sistema horno-caldera.

Al ocurrir una explosión en el sistema horno-caldera la probabilidad de efecto dominó es 99,12% con una probabilidad de propagación hacia las unidades secundarias del mismo valor. El enfriador es el equipo donde la probabilidad de propagación del accidente es mayor.

3.4.1. Resultados y análisis de la probabilidad conjunta de efecto dominó

La probabilidad conjunta del efecto dominó se determina a partir de la sumatoria de las probabilidades del carácter continuado a todos los niveles. En esta investigación solo existe un nivel primario de propagación de accidente y teniendo en cuenta que este valor es frecuencial la probabilidad conjunta de efecto dominó 9,91% al año. Este valor implica un potencial de peligrosidad elevado según Cai, Liu, y Fan (2016); (Kabir y Papadopoulos, 2019; Kadri y Chatelet, 2013; Leoni *et al.*, 2019; Zerrouki y Smadi, 2017).

3.5. Resultados y análisis del impacto individual debido al efecto continuado de accidente

El impacto individual traducido en el análisis de riesgos como curvas de isorriesgos es un paso previo de suma importancia en la cuantificación del riesgo social.

La vulnerabilidad expresa la sumatoria de las probabilidades de perjuicios a las personas a la hemorragia pulmonar y rotura de tímpanos por sobrepresión en el caso de los escenarios de explosión. Los valores calculados se muestran en la Figura 3.11.

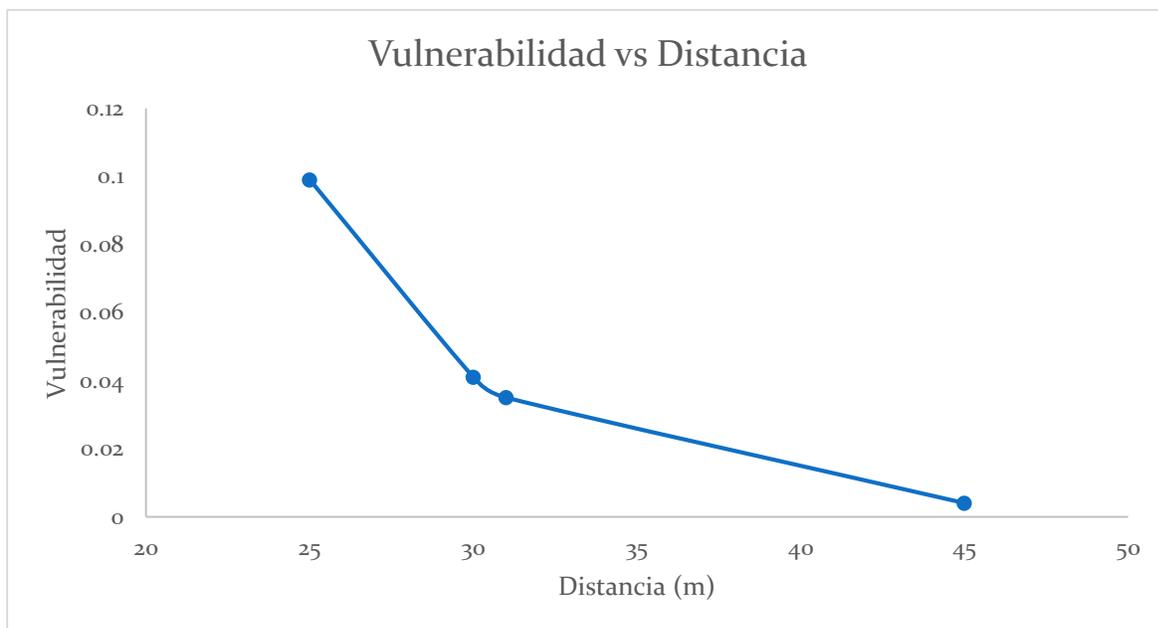


Figura 3.11: Comportamiento de la vulnerabilidad asociada al efecto continuado de accidente en función de la distancia

A los 25 metros alcanza una vulnerabilidad de aproximadamente 0,1, esto se traduce a que las personas que estén dentro de ese radio de afectación son vulnerables a sufrir daños producto de una explosión en la caldera, no siendo así a la distancia de 45 metros donde las personas que se encuentren cerca de la zona no serán prácticamente afectadas por el accidente. Estos valores de vulnerabilidad coinciden con los obtenidos por Huyen yTram (2019).

3.5.1. Resultados y análisis de las curvas de isorriesgos

Con los valores de vulnerabilidad y probabilidad conjunta que se obtiene a partir de la red bayesiana elaborada se determina el riesgo individual expresado en curvas de isorriesgos. Las curvas de isorriesgos se muestra en la Figura 3.12.



Figura 3.12: Curvas de isorriesgos correspondiente al sistema horno-caldera

En la Figura 3.12 se observa el nivel de riesgo elevado que existe en las personas dentro de la empresa al considerar el carácter continuado de una explosión en el sistema horno caldera.

A distancias comprendidas entre 25, 30 y 31 metros pueden producirse hasta diez, cuatro y tres fatalidades en 100 años respectivamente, y sigue disminuyendo cuando aumenta la distancia hasta 45 metros, lo que evidencia el comportamiento inversamente

proporcional que existe entre el nivel de riesgo y la longitud considerada, a medida que aumenta el radio disminuye el riesgo individual, lo que se debe a que en estos radios de acción disminuyen los equipos cuyo vector de escalado sea significativo en el valor de la vulnerabilidad. Estos valores se consideran altos según Reniers y Cozzani (2013); (Wells, 2003).

3.6. Conclusiones parciales del capítulo

1. La nube tóxica formada a partir del escape de dióxido de azufre por la explosión del sistema horno-caldera, alcanza una concentración de 25 ppm hasta 1 km, lo que implica el nivel de preocupación ERPG-3 que establece efectos potencialmente mortales para la salud.
2. La probabilidad de daños en los puntos 1 y 2 de la Tabla 2.1 a partir de la formación de una nube tóxica de SO₂, no son elevadas, pero si provocan daños en la piel y las vías respiratorias de las personas.
3. La nube tóxica formada a partir del escape de trióxido de azufre por la explosión del sistema horno-caldera, alcanza una concentración de 0,12 ppm hasta 762 m, lo que implica el nivel de preocupación ERPG-3 que establece efectos potencialmente mortales para la salud.
4. El SO₃ puede provocar la aparición de edema pulmonar en algunos de los habitantes de las zonas analizadas con respecto a las concentraciones que se dan en ellas.
5. Los valores de sobrepresión que se pueden dar en caso de la explosión en el sistema horno-caldera demuestran que se pueden romper ventanas, pueden ocasionarse laceraciones en las personas por los proyectiles y existe una probabilidad de hasta 90% que las personas tengan roturas de tímpanos.
6. La bibliografía especializada arroja que la frecuencia con que puede ocurrir un fallo en el sistema horno caldera es de 0,9 a⁻¹.
7. La probabilidad de escalado es mayor para el enfriador con 0,90.
8. La red bayesiana demuestra una probabilidad conjunta de efecto dominó de 9,91% anualmente.

9. Al considerar las consecuencias conjuntas en el mapa de isorriesgos del accidente de explosión, pueden producirse 16 fatalidades en 100 años en las distancias comprendidas de 25 a 31 metros, después de estas distancias los valores disminuyen.

CONCLUSIONES

1. La utilización de las redes bayesianas y su integración con técnicas de análisis de riesgos como el Análisis Histórico de Accidentes, el Árbol de Eventos y la Simulación de escenarios, para cuantificar la frecuencia del efecto dominó de accidentes permitió la estimación de los daños sobre las personas debido a los efectos sinérgicos de accidentes de explosión y tóxicos.
2. El valor máximo registrado para el vector de escalado por sobrepresión debido a una explosión mecánica en el sistema horno-caldera es 0,31 bar a una distancia de 25 metros; y para el vector concentración 0,3 ppm a una distancia de 10 km.
3. La probabilidad conjunta de efecto dominó calculada a partir de la red bayesiana arroja un valor de 9,91% por año de probabilidad de ocurrencia del efecto dominó por fallo en el sistema horno-caldera.
4. Los efectos sinérgicos de los accidentes, mostrados en los mapas de isorriesgos, permiten confirmar que pueden producirse 10, cuatro y tres defunciones a una distancia de 25, 30 y 31 metros respectivamente en 100 años.

RECOMENDACIONES

1. Realizar en próximas etapas de investigación que se desarrolle una red Petri para cuantificar la probabilidad de escalado producto a accidentes tóxicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abdolhamidzadeh, B., yAbbasi, T., yRashtchian, D., yAbbasi, S. A. (2011). Domino effect in process-industry accidents – An inventory of past events and identification of some patterns. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24(5), 575-593. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2010.06.013>
2. Ahmadi, O., yMortazavi, S. B., yMahabadi, H. A., yHosseinpouri, M. (2020). Development of a dynamic quantitative risk assessment methodology using fuzzy DEMATEL-BN and leading indicators. *Process Safety and Environmental Protection*, 142, 15-44. doi:<https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.04.038>
3. Alaw, F., ySulaiman, N. (2020). *Development of risk assessment model for biomass plant boiler using bayesian network*. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
4. Alileche, N., yOlivier, D., yEstel, L., yCozzani, V. J. S. s. (2017). Analysis of domino effect in the process industry using the event tree method. 97, 10-19.
5. Argenti, F., yLanducci, G., yAntonioni, G., yCozzani, V. (2014). Frequency evaluation for domino scenarios triggered by heat radiation exposure. doi:<https://dx.doi.org/10.3303/CET1436063>
6. Atkinson, G. (2017). Development of heavy vapour clouds in very low wind speeds. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 48, 162-172. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.04.011>
7. Atkinson, G., yCowpe, E., yHalliday, J., yPainter, D. (2017). A review of very large vapour cloud explosions: Cloud formation and explosion severity. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 48, 367-375. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.03.021>
8. Basheer, A., yTauseef, S. M., yAbbasi, T., yAbbasi, S. A. J. I. J. o. S. A. E., yManagement. (2019). A template for quantitative risk assessment of facilities storing hazardous chemicals. 10(5), 1158-1172.
9. Birk, A. M., yDavison, C., yCunningham, M. (2007). Blast overpressures from medium scale BLEVE tests. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 20(3), 194-206. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2007.03.001>
10. Birk, A. M., yHeymes, F., yEyssette, R., yLauret, P., yAprin, L., ySlangen, P. (2018). Near-field BLEVE overpressure effects: The shock start model. *Process Safety and Environmental Protection*, 116, 727-736. doi:<https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.04.003>
11. Bubbico, R., yMazzarotta, B. (2013). Analysis and comparison of calculation methods for physical explosions of compressed gases. *Chemical Engineering Transactions*, 32, 133-138. doi:<https://doi.org/10.3303/CET1332023>
12. Cai, B., yLiu, Y., yFan, Q. (2016). A multiphase dynamic Bayesian networks methodology for the determination of safety integrity levels. *Reliability Engineering & System Safety*, 150, 105-115. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.01.018>
13. Cai, B., yLiu, Y., yFan, Q. J. R. E., ySafety, S. (2016). A multiphase dynamic Bayesian networks methodology for the determination of safety integrity levels. 150, 105-115.

14. Cai, B., yLiu, Y., yLiu, Z., yChang, Y., yJiang, L. (2020). A Multiphase Dynamic Bayesian Network Methodology for the Determination of Safety Integrity Levels *Bayesian Networks for Reliability Engineering* (pp. 217-237): Springer.
15. Casal, J. (2021). Análisis del riesgo en instalaciones industriales: Edicions UPC.
16. Casal, J., yDarbra, R.-M. (2013). Analysis of past accidents and relevant case-histories *Domino Effects in the Process Industries* (pp. 12-29): Elsevier.
17. Chen, C., yReniers, G., yZhang, L. (2018). An innovative methodology for quickly modeling the spatial-temporal evolution of domino accidents triggered by fire. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 54, 312-324. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.04.012>
18. Darbra, R., yPalacios, A., yCasal, J. J. J. o. h. m. (2010). Domino effect in chemical accidents: Main features and accident sequences. 183(1-3), 565-573.
19. Darbra, R. M., yPalacios, A., yCasal, J. (2010). Domino effect in chemical accidents: Main features and accident sequences. *Journal of Hazardous Materials*, 183(1), 565-573. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.07.061>
20. Denat, T. (2017). Creation of a Biodiversity Severity Index to evaluate the risks of accidental pollutions in the industry: a multi-criteria sorting approach.
21. Dueñas Santana, J. A., yOrozco, J. L., yFebles Lantigua, D., yFurka, D., yFurka, S., yGarcía Cruz, A. (2021). Using integrated Bayesian-Petri Net method for individual impact assessment of domino effect accidents. *Journal of Cleaner Production*, 294, 126236. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126236>
22. Dueñas Santana, J. A., yOrozco, J. L., yFurka, D., yFurka, S., yBoza Matos, Y. C., yFebles Lantigua, D., . . . Barrera González, M. C. (2021). A new Fuzzy-Bayesian approach for the determination of failure probability due to thermal radiation in domino effect accidents. *Engineering Failure Analysis*, 120, 105106. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105106>
23. Ewing, D. J., yCampbell, J. J. N. E. (1994). Tolerability of risk, safety assessment principles and their implications for probabilistic safety analysis. 33(2).
24. Gai, W.-m., yDeng, Y.-f., yJiang, Z.-a., yLi, J., yDu, Y. (2017). Multi-objective evacuation routing optimization for toxic cloud releases. *Reliability Engineering & System Safety*, 159, 58-68. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.10.021>
25. Gai, W.-m., yDu, Y., yDeng, Y.-f. (2018). Regional evacuation modeling for toxic-cloud releases and its application in strategy assessment of evacuation warning. *Safety Science*, 109, 256-269. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.06.007>
26. Gai, W.-m., yJia, H.-j., yXi, X.-j., yDeng, Y.-f. (2020). 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*, 63, 103993. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.103993>
27. Galán Fontenla, S. (2018). Explosión de equipos presión: Análisis de riesgos y consecuencias.
28. González, D. (2012). La relación entre seguridad humana y derechos humanos algunos apuntes para el debate: sistematización de pasantía en el Proyecto " Desarrollo y promoción del concepto de seguridad humana en América Latina" del Instituto Interamericano de Derechos Humanos (IIDH) y el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

29. Gyenes, Z., yWood, M. H., yStruckl, M. (2017). Handbook of scenarios for assessing major chemical accident risks. *Luxembourg: Publications Office of the European Union*, 115. doi: <http://doi.org/10.2760/884152>
30. Hardy, T., yModlinski, N. (2017). Development of Prognostic Tool for High-temperature Corrosion Risk Assessment in Pulverised Coal Boilers Based on the Waterwalls Boundary Layer Monitoring System and CFD Simulations. *Energy Procedia*, 105, 1833-1838. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.536>
31. Harrison, S. (1977). National board of boiler and pressure-vessel inspector. *PLANT ENGINEERING*, 31(9), 205-207.
32. Hedlund, F. H. (2018). Carbon dioxide not suitable for extinguishment of smouldering silo fires: Static electricity may cause silo explosion. *Biomass and Bioenergy*, 108, 113-119. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.11.009>
33. Hedo, E. B. (2015). 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. *Actualidad Jurídica Ambiental*(51), 38-39.
34. HSE. (2018). Annual Science Review. *Helping Great work we*.
35. Huang, Y. (2017). *Quantitative risk analysis for explosion safety of oil and gas facilities*. Tesis presentada para obtener el grado científico de Doctor en Filosofía
36. Hugin. (2019). Gasvaerksvej 5. DK-9000 Aalborg. Denmark. Lite 8.7.
37. Huyen, D. T. T., yTram, L. T. B. (2019). Development of a procedure for evaluating the impacts of the accidental emission of hazardous chemicals, case study in Ho Chi Minh City, Vietnam. *Environmental management*, 63(4), 486-494. doi: <http://doi.org/10.1007/s00267-017-0979-0>.
38. Ibrahim, M. F., yEl-Arabaty, H., yMoharran, I. (2019). Effect of steam boiler explosion on boiler room and adjacent buildings structure. *Int J Eng Sci*, 17-37.
39. Jeon, D., yKim, K., yHan, S. (2017). Modified equation of shock wave parameters. *Computation*, 5(3), 41. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2079-3197/5/3/41>
40. Jiao, Z., yJi, C., ySun, Y., yHong, Y., yWang, Q. (2021). Deep learning based quantitative property-consequence relationship (QPCR) models for toxic dispersion prediction. *Process Safety and Environmental Protection*, 152, 352-360. doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.06.019>
41. Jones, R., yLehr, W., ySimecek-Beatty, D., yReynolds, M. (2013). ALOHA®(Areal Locations of Hazardous Atmospheres) 5.4. 4: Technical Documentation.
42. Kabir, S., yPapadopoulos, Y. (2019). Applications of Bayesian networks and Petri nets in safety, reliability, and risk assessments: A review. *Safety Science*, 115, 154-175. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.02.009>
43. Kadri, F., yChatelet, E. (2013). Domino effect analysis and assessment of industrial sites: A review of methodologies and software tools. *International Journal of Computers and Distributed Systems*, 2(III), 1-10. Retrieved from <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01026495>
44. Khakzad, N. (2021). A Tutorial on Fire Domino Effect Modeling Using Bayesian Networks. *Modelling*, 2(2), 240-258. doi: <https://doi.org/10.3390/modelling2020013>
45. Khakzad, N., yAmyotte, P., yCozzani, V., yReniers, G., yPasman, H. (2018a). How to address model uncertainty in the escalation of domino effects? *Journal of Loss*

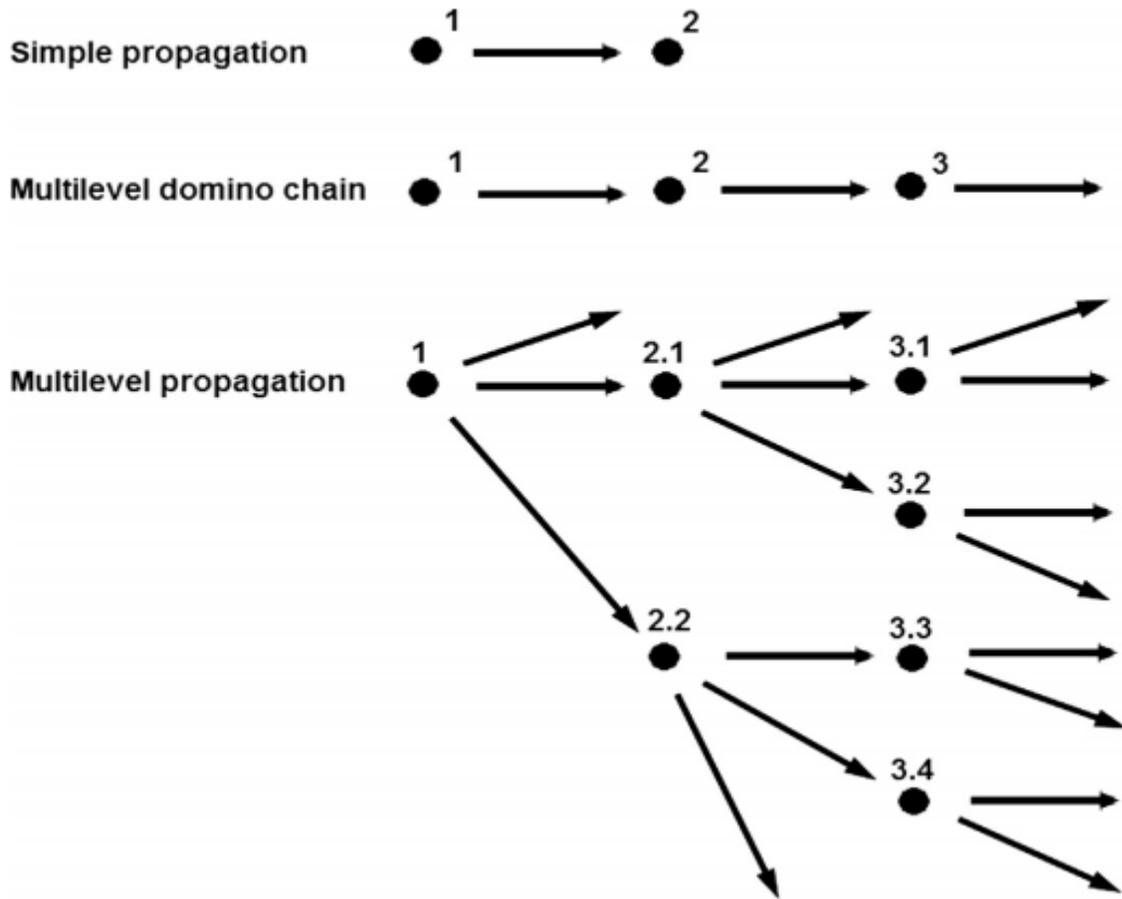
- Prevention in the Process Industries*, 54, 49-56.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.03.001>
46. Khakzad, N., yAmyotte, P., yCozzani, V., yReniers, G., yPasmaan, H. J. J. o. L. P. i. t. P. I. (2018b). How to address model uncertainty in the escalation of domino effects? , 54, 49-56.
 47. Khakzad, N., yReniers, G. (2015). Using graph theory to analyze the vulnerability of process plants in the context of cascading effects. *Reliability Engineering & System Safety*, 143, 63-73. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.04.015>
 48. Larsson, F., yBertilsson, S., yFurlani, M., yAlbinsson, I., yMellander, B.-E. (2018). Gas explosions and thermal runaways during external heating abuse of commercial lithium-ion graphite-LiCoO₂ cells at different levels of ageing. *Journal of Power Sources*, 373, 220-231. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.10.085>
 49. Laurent, A., yPerrin, L., yDufaud, O. (2016). Consequence Assessments of a Cold BLEVE. Can We Do It Better? *Chemical Engineering Transactions*, 48, 211-216. doi:<http://doi.org/10.3303/CET1648036>
 50. Leoni, L., yBahooToroody, A., yDe Carlo, F., yPaltrinieri, N. (2019). 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*, 57, 17-24. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.11.003>
 51. Less, F. P. (2012). *Loss prevention in the process industries: hazard identification, assessment and control* (Fourth Edition ed.): Butterworth-Heinemann.
 52. Lisi, R., yConsolo, G., yMaschio, G., yMilazzo, M. (2014). Domino effects due to the projection of fragments: estimation of the impact probability using a Monte Carlo simulation. *Chemical Engineering Transactions*, 36, 361-366. doi:<https://doi.org/10.3303/CET1436061>
 53. López, J. (2017). *Análisis cuantitativo de riesgos de tuberías de transporte de sustancias peligrosas*. Universitat Politècnica de Catalunya.
 54. Maaskant, B., yJonkman, S., yJongejan, R. (2009). 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. *ESREL-2009*.
 55. Manual, u. s. (2007). ALOHA®.
 56. Markert, F. (2018). Methods supporting fire risk assessment and management.
 57. Morales-Vargas, R. A. (2020). Simulación numérica de explosiones en calderas: Pautas para la distribución de planta como medida de mitigación de daños. *Revista de Salud Ambiental*, 20(2), 137-149. Retrieved from <https://ojs.diffundit.com/index.php/rsa/article/view/1041>
 58. Nair, S. R., yOgbeifun, N. O., yWen, J. (2022). Consequence assessment considerations for toxic natural gas dispersion modeling. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 78, 104792. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104792>
 59. Necci, A. (2019). Cascading events triggering industrial accidents: quantitative assessment of NaTech and domino scenarios.
 60. Nolan, D. P. (2014). *Handbook of fire and explosion protection engineering principles: for oil, gas, chemical and related facilities*: William Andrew.

61. Nomen, R., ySempere, J., yMariotti, V. (2014). QRA Including Domino Effect as a Tool for Engineering Design. *Procedia Engineering*, 84, 23-32. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.406>
62. Orozco, J. L., yVan Caneghem, J., yHens, L., yGonzález, L., yLugo, R., yDíaz, S., yPedroso, I. (2019). Assessment of an ammonia incident in the industrial area of Matanzas. *Journal of Cleaner Production*, 222, 934-941. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.024>
63. Ping, P., yWang, K., yKong, D., yChen, G. (2018). Estimating probability of success of escape, evacuation, and rescue (EER) on the offshore platform by integrating Bayesian Network and Fuzzy AHP. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 54, 57-68. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.02.007>
64. Reche Motos, M. (2018). Los accidentes graves en la industria química: análisis de la normativa Seveso y nuevas propuestas. *Proyecto de investigación*. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10201/56106>
65. Rehman, A., ySeay, J., yBadurdeen, F. (2018). Application of Bayesian Belief Network for the Analysis of Accident Data in the Bioenergy Manufacturing Sector. *Chemical Engineering Transactions*, 65, 349-354.
66. Reniers, G., yCozzani, V. (2013). *Domino effects in the process industries: modelling, prevention and managing*. Newnes.
67. Renjith, V., yMadhu, G. (2010). 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*, 1(2), 135.
68. Ropero, R. M. F., yAguilera, P. A., yFernández, A., yRumí, R. (2014). Redes bayesianas: una herramienta probabilística en los modelos de distribución de especies. *Ecosistemas*, 23(1), 54-60. doi:<https://doi.org/10.7818/ECOS.2014.23-1.08>
69. Sajid, Z., yKhan, M. K., yRahnama, A., yMoghaddam, F. S., yVardhan, K., yKalani, R. (2021). Computational fluid dynamics (CFD) modeling and analysis of hydrocarbon vapor cloud explosions (VCEs) in Amuay refinery and Jaipur plant using FLACS. *Processes*, 9(6), 960. doi:<https://doi.org/10.3390/pr9060960>
70. Santana, J. A. D., yMiranda, A. G., yOrozco, J. L., yArana, Y. C., yLantigua, D. F., yFebles, J. S. (2020). How to Determine Individual Risk Due to Toxic, Fire, and Explosion Accidents in a Hydrocarbon Processing Area? *International Journal of Petroleum Technology*, 7, 60-73. doi:<https://doi.org/10.15377/2409-787X.2020.07.6>
71. Sengupta, A., yBandyopadhyay, D., yRoy, S., yvan Westen, C. J., yvan der Veen, A. (2016). Challenges for introducing risk assessment into land use planning decisions in an Indian context. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 42, 14-26. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.10.007>
72. Shrivastava, R., yPatel, P. (2014). Hazards identification and risk assessment in thermal power plant. *Int J Eng Res Technol*, 3(4), 1737.
73. Singh, A. K., yChandra, R. (2019). Pollutants released from the pulp paper industry: Aquatic toxicity and their health hazards. *Aquatic Toxicology*, 211, 202-216. doi:<https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2019.04.007>

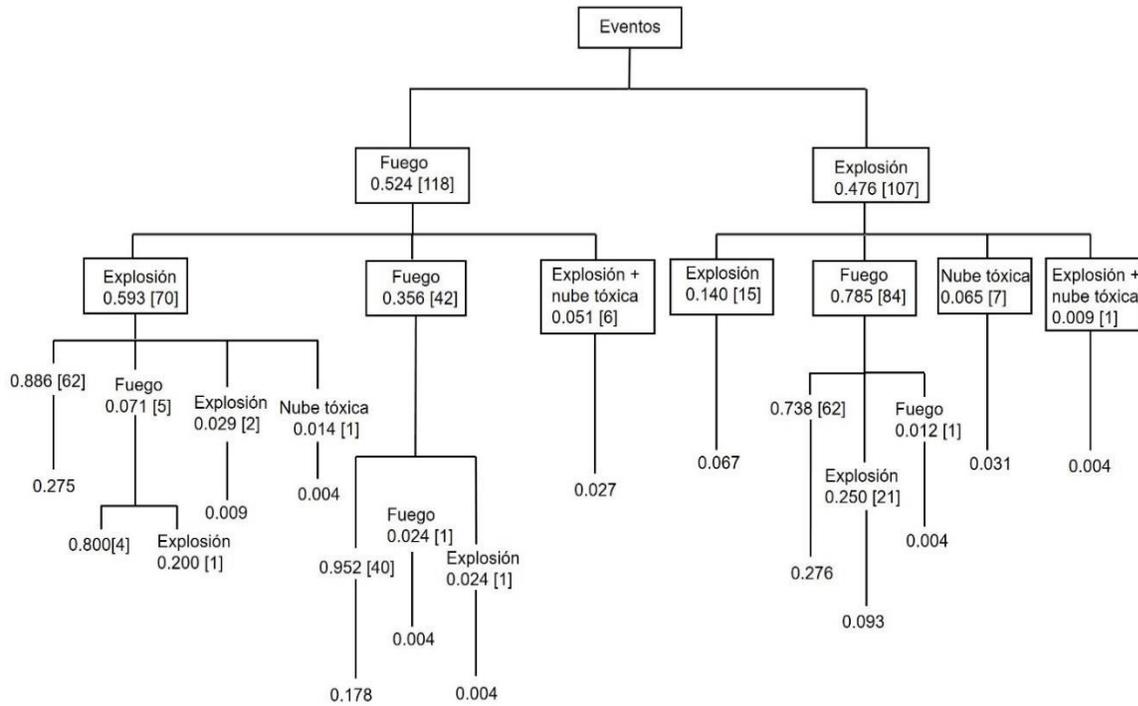
74. Sochet, I. (2010). *Blast effects of external explosions*. Paper presented at the Eighth International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions.
75. Ștefănescu, L., yBotezan, C., yCrăciun, I. (2018). Vulnerability analysis for two accident scenarios at an upper-tier seveso establishment in romania. *Geographia Technica*, 13(1). doi:http://doi.org/10.21163/GT_2018.131.10
76. Tang, K. H. D., yMd Dawal, S. Z., yOlugu, E. U. (2018). Integrating fuzzy expert system and scoring system for safety performance evaluation of offshore oil and gas platforms in Malaysia. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 56, 32-45. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.08.005>
77. Tao, Y., yLu, K., yChen, X., yMao, S., yDing, Y., yZhao, Y. (2020). Experimental investigation on the temperature profile of large scale RP – 5 aviation kerosene pool fire in an open space. *Fuel*, 264, 116852. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116852>
78. Tugnoli, A., yScarponi, G. E., yAntonioni, G., yCozzani, V. J. R. E., ySafety, S. (2022). Quantitative assessment of domino effect and escalation scenarios caused by fragment projection. 217, 108059.
79. Vieira, E. M. d. A., ySilva, J. M. N. d., ySilva, L. B. d. (2017). Modeling Bayesian Networks from a conceptual framework for occupational risk analysis. *Production*, 27. doi:<http://dx.doi.org/10.1590/0103-6513.223916>
80. Villa, V., yCozzani, V. (2016). Application of Bayesian networks to quantitative assessment of safety barriers' performance in the prevention of major accidents. *Chemical Engineering Transactions*, 53, 151-156. doi:<https://doi.org/10.3303/CET1653026>
81. Wang, H., yKhan, F., yAhmed, S., ylmtiaz, S. (2016). Dynamic quantitative operational risk assessment of chemical processes. *Chemical Engineering Science*, 142, 62-78. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.11.034>
82. Wang, R., yLiu, G., yZhang, J. (2015). Variations of emission characterization of PAHs emitted from different utility boilers of coal-fired power plants and risk assessment related to atmospheric PAHs. *Science of The Total Environment*, 538, 180-190. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.043>
83. Wells, G. L. (2003). *Major hazards and their management*. IChemE.
84. Wiering, M., yGreen, C., yvan Rijswick, M., yPriest, S., yKeessen, A. J. J. o. W., yChange, C. (2015). The rationales of resilience in English and Dutch flood risk policies. 6(1), 38-54.
85. Zareei, H., yKhosravi Nikou, M., yShariati, A. (2016). A consequence analysis of the explosion of spherical tanks containing liquefied petroleum gas (LPG). *Iranian Journal of Oil and Gas Science and Technology*, 5(3), 32-44.
86. Zarei, E., yAzadeh, A., yKhakzad, N., yAliabadi, M. M., yMohammadfam, I. (2017). Dynamic safety assessment of natural gas stations using Bayesian network. *Journal of Hazardous Materials*, 321, 830-840. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.09.074>
87. Zerrouki, H., ySmadi, H. (2017). Bayesian Belief Network Used in the Chemical and Process Industry: A Review and Application. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 17(1), 159-165. doi:<http://doi.org/10.1007/s11668-016-0231>

88. Zerrouki, H., yTamrabet, A. (2015). Safety and Risk Analysis of an Operational Heater Using Bayesian Network. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 15(5), 657-661. doi:<https://doi.org/10.1007/s11668-015-9986-8>
89. Zhang, L., yLanducci, G., yReniers, G., yKhakzad, N., yZhou, J. (2018). DAMS: a model to assess domino effects by using agent-based modeling and simulation. *Risk analysis*, 38(8), 1585-1600. doi:<https://doi.org/10.1111/risa.12955>
90. Zhang, Q., yZhou, G., yHu, Y., yWang, S., ySun, B., yYin, W., yGuo, F. (2019). Risk evaluation and analysis of a gas tank explosion based on a vapor cloud explosion model: A case study. *Engineering Failure Analysis*, 101, 22-35. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.03.003>
91. Zong, L., yWang, Y., yWu, B. (2017, 8-10 Aug. 2017). *Risk assessment framework for fire accidents in the ship engine room*. Paper presented at the 2017 4th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS).

Anexo 1: Ejemplos de propagación simple, cadena de dominó de múltiples niveles y patrones de propagación en paralelo de múltiples niveles.

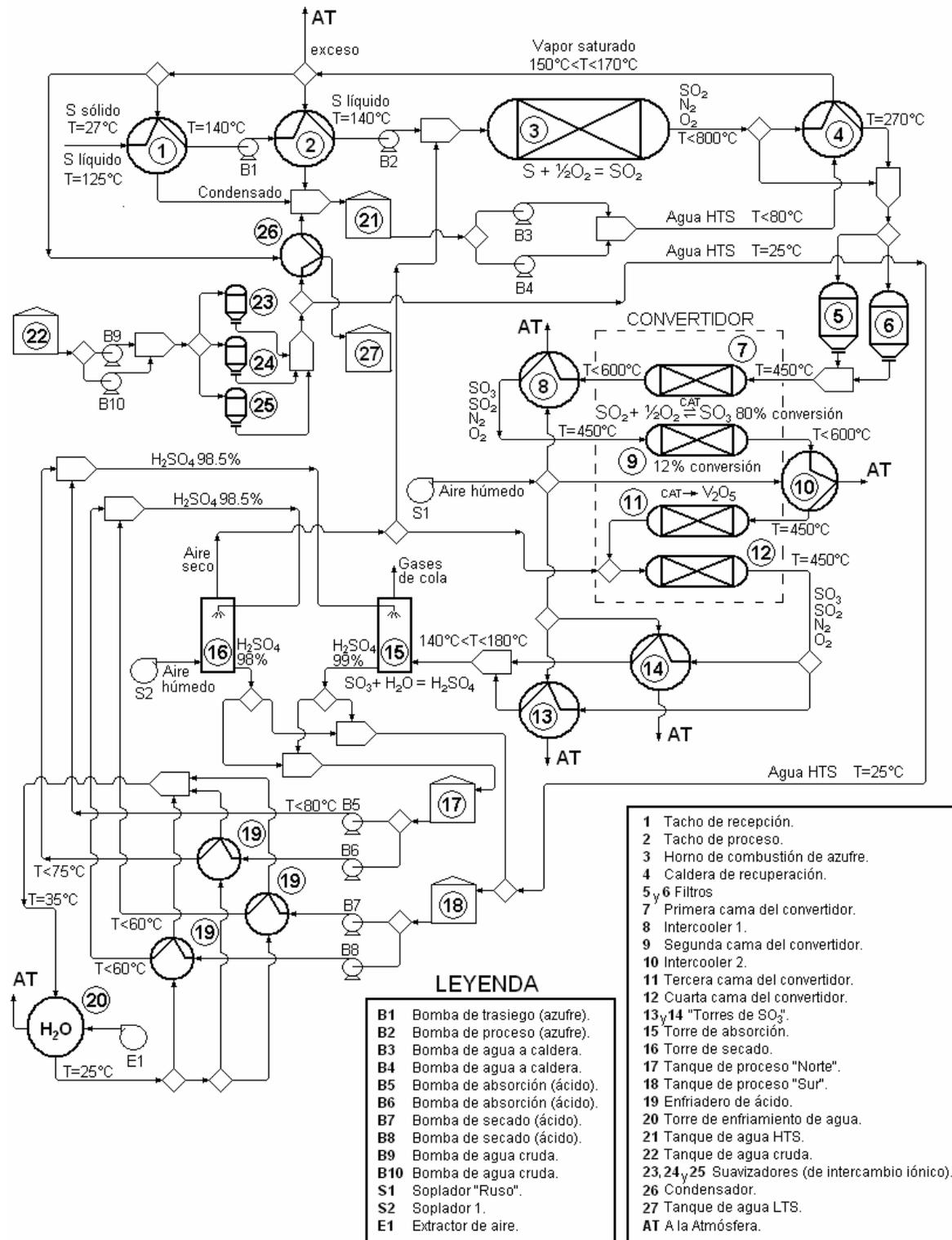


Anexo 2: Árbol de probabilidad relativa que muestra las diversas secuencias del efecto dominó (R. M. Darbra *et al.*, 2010).

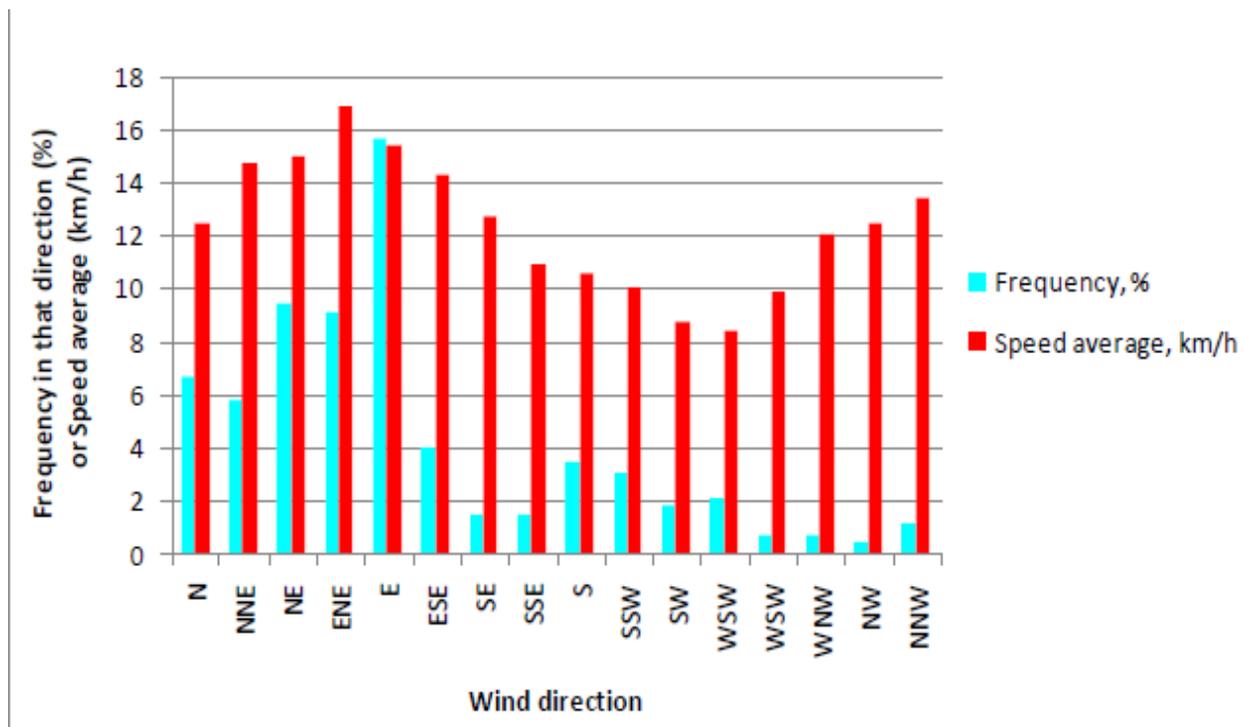


Nota: Los valores entre corchetes expresan la probabilidad ramal, mientras que el resto representa la cantidad de accidentes estudiados.

Anexo 3: Diagrama de flujo de Información de la planta de ácido sulfúrico de la UEB Rayonitro de Matanzas.



Anexo 4: Gráfico con comportamiento de las direcciones, frecuencia y dirección del viento en la zona de la UEB Rayonitro (Orozco *et al.*, 2019).



Anexo 5: Función Probit en MATLAB:

```
f = @(x) exp(-x.^2/2);
```

```
Y=input('Probit ');
```

```
Q = integral(f,-Inf,Y-5);
```

```
P = ((1/(2*pi))^0.5)*Q;
```

```
disp(['P ' num2str(P)]);
```

Anexo 6: Resultados de las corridas en ALOHA.

Tabla A6.1: Distancia que abarca la nube tóxica para SO₂ y SO₃ para cada nivel de preocupación en cada velocidad del viento para la mayor temperatura del aire.

Temperatura máxima del aire												
Equipos	Velocidad máxima del viento						Velocidad mínima del viento					
	ERPG-1		ERPG-2		ERPG-3		ERPG-1		ERPG-2		ERPG-3	
	ENE	E	ENE	E	ENE	E	ENE	E	ENE	E	ENE	E
Horno-caldera SO ₂	7,0km	7,3km	2,1km	2,1km	663m	682m	>10km	>10km	4,1km	4,1km	1,0km	1,0 km
Torre de absorción SO ₃	4,7km	4,9km	2km	2,1km	519m	541m	9,4km	9,4km	3,7km	3,7km	756m	75 6m

Tabla A6.2: Distancia que abarca la nube tóxica para SO₂ y SO₃ para cada nivel de preocupación en cada velocidad del viento para la menor temperatura del aire.

Temperatura mínima del aire												
Equipos	Velocidad máxima del viento						Velocidad mínima del viento					
	ERPG-1		ERPG-2		ERPG-3		ERPG-1		ERPG-2		ERPG-3	
	ENE	E	ENE	E	ENE	E	ENE	E	ENE	E	ENE	E
Horno-caldera SO ₂	6,8km	7,1km	2,0km	2,1km	639m	664m	>10km	>10km	3,9km	3,9km	1,0km	1,0 km
Torre de absorción SO ₃	4,7km	4,9km	2,0km	2,1km	522m	540m	9,6km	9,6km	3,9km	3,9km	762m	76 2m

Nota: Para ambas tablas los niveles de preocupación ERPG-1, ERPG-2, Y ERPG-3, equivalen a la concentración de: para SO₂ 0,3 ppm, 3ppm y 25ppm respectivamente; para SO₃: 2mg/m³, 10mg/m³ y 120mg/m³ respectivamente.

