

**UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS
FACULTAD DE QUÍMICA Y FARMACIA
CENTRO DE ESTUDIO DE QUÍMICA APLICADA**



**Tesis para optar por el grado de Máster en Seguridad tecnológica
y ambiental en procesos químicos**

TÍTULO:

**Metodología de análisis cuantitativo de riesgo incluyendo el
efecto dominó**

Autor: Ing. Eusebio Vladimir Ibarra Hernández

**Tutores: Dr. Félix Abel Goya Valdivia
Dra. Belkis F. Guerra Valdés**

Santa Clara

2016

“Año 58 de la Revolución”



Pensamiento

Para que una idea triunfe hay que creer en ella, hay que pensarla bien, hay que predicarla y hay que persuadir a mucha gente y entonces al final la idea triunfa.

Fidel Castro Ruz



Agradecimientos

*A mis **tutores**, por su paciencia e incondicionalidad en la realización de este trabajo, sin su ayuda e insistencia no habría culminado.*

*A mis **amigos**, el gordo, la gordi, al yuni, por ser mis amigos.*

*A mi **esposa e hijas**, por todos sus sacrificios;*

*A mis **compañeros de trabajo** por su inestimable y siempre oportuno apoyo;*

A todos muchas gracias



Resumen

RESUMEN

El Efecto Domino (ED), en las instalaciones industriales, es un fenómeno muy complejo, que de no brindársele la atención requerida, puede provocar severos daños a las propiedades, a las personas y al medio ambiente, por lo que diferentes normativas internacionales como las directivas *Seveso II* y *Seveso III*, adoptadas por la Unión Europea, obligan a realizar el Análisis Cuantitativo de Riesgo (*QRA*) en instalaciones que manejen sustancias peligrosas, considerando el ED. En Cuba, en los últimos años, se han dictado medidas como la Resolución 148/2013 del Citma, para evaluar los accidentes mayores, y aunque no se exige directamente la evaluación del ED, si está implícito en sus consideraciones.

Las dificultades del *QRA* integrando el ED conllevan al predominio de los métodos cualitativos y la desestimación del riesgo real existente. Los resultados del estudio bibliográfico revelan que aunque existen varios modelos para el *QRA*, en ningún caso se explica metodológicamente como incorporarle el ED. Existe, por tanto, la necesidad del desarrollo de una metodología que defina claramente como el ED pueda ser efectivamente analizado dentro de los límites de un *QRA* convencional.

En este trabajo se propone una nueva metodología flexible e integral que permite la evaluación de la influencia del ED en el aumento de la frecuencia e intensificación de las consecuencias de los accidentes mayores probables en la industria química, tomando como base las fortalezas de los métodos de análisis publicados en las numerosas referencias bibliográficas estudiadas, sin depender de complejos algoritmos computacionales.

La metodología desarrollada fue aplicada al “Almacén Tecnológico de Gas Licuado del Petróleo (GLP), Santa Clara”, lo que permitió evaluar la funcionalidad y adecuación de cada uno de sus procedimientos dentro de los límites de tiempo razonables para un *QRA*, y comprobar que la estructura metodológica propuesta garantiza el flujo necesario del análisis incluyendo el ED.



Summary

SUMMARY

Domino effects (DE) in industrial installations are complex phenomenon that may cause severe damage on property, life and the environment if not dealt with in a sufficient manner. Different international regulations such as the Seveso II and III Directives, adopted it by the European Union, stated actions to be taken, as the quantitative risk analysis considering DE, in the process industry in order to prevent and limit the impact of serious chemical accidents. In Cuba, in recent years, measures have been issued as Resolution 148/2013 of Citma to evaluate major accidents, and although not directly require the evaluation of DE, if it is implicit in its considerations.

Due to the high degree of complexity linked with domino effects, these aspects are mostly dealt with in a qualitative manner. Such approach leads to subjective assessments leading to results that may be questionable. Looking at existing approaches for analyzing domino effects in a quantitative way, several models are available in literature. These models show that domino effects effectively can be integrated in a QRA, but do not provide any guidance of how these effects should be incorporated in an analysis. Thus, there is a need for comprehensive methods that clearly define how domino effects effectively can be implemented and analyzed within the boundaries of a conventional QRA framework

In this paper a new flexible and comprehensive methodology is proposed that allows evaluation of the influence of DE in increasing frequency and intensification of the likely consequences of major accidents in the chemical industry, based on the latest research on the area and without relying on complex computational algorithms.

The developed methodology has been applied in a case study of a "Warehouse Technology Liquefied Petroleum Gas (LPG), Santa Clara", in order to evaluate the functionality and suitability of each of its procedures within reasonable time limits for QRA, and check that the proposed methodological structure ensures the necessary flow analysis including the DE.



Tabla de contenido

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. Estudio bibliográfico	4
1.1. Análisis de riesgo cuantitativo en la industria química.....	4
1.1.1. Alcance y contexto del análisis.....	5
1.1.2. Identificación de los peligros.....	5
1.1.3. Estimación de la frecuencia.....	7
1.1.4. Análisis de consecuencias.....	8
1.1.5. Presentación del perfil de riesgo.....	9
1.2. El efecto dominó como fenómeno de intensificación del riesgo	11
1.2.1. Efecto dominó.....	11
1.2.2. Escenario primario.....	12
1.2.3. Unidades destino.....	13
1.2.4. Definición de vectores de intensificación.....	13
1.2.5. La cadena de accidentes y los diferentes tipos de efectos dominó.....	19
1.2.6. Valores umbrales de intensificación.....	20
1.2.7. Daños esperados en equipos destino producto de las cargas de calor, tiempo hasta el fallo.....	21
1.2.8. Estimación del estado de daño e intensidad de pérdidas de cada unidad destino.....	23
1.2.9. Daños esperados en equipos destino producto de las cargas de sobrepresión.....	24
1.2.10. Daños esperados en equipos destino producto del impacto de la proyección de fragmentos.....	24
1.2.11. Clasificación relativa del riesgo de efecto dominó.....	25
1.2.12. Cálculo de la frecuencia y consecuencia total del ED.....	26
1.2.13. Representación del perfil de riesgo incluyendo el ED.....	30
1.3. Modelos existentes para la integración del efecto dominó en el <i>QRA</i>	31
Conclusiones parciales.....	32
CAPÍTULO II. Metodología para el análisis cuantitativo de riesgo de accidentes mayores probables en la industria química, considerando la intensificación de los daños por efecto dominó	33
2.1. Definición del alcance y contexto del análisis de riesgo cuantitativo (<i>Cuadro No.1</i>).....	36
2.2. Identificación de peligros o factores de riesgo (<i>Cuadro No.2</i>).....	36
2.3. Identificación y clasificación de las unidades creíbles de accidente mayor (<i>Cuadro No.3</i>).....	38
2.4. Especificación de la unidad primaria (<i>Cuadro No.4</i>).....	39
2.5. Definición de los valores umbrales de intensificación.....	39
2.6. Análisis de frecuencia y consecuencias del accidente primario (<i>Cuadro No.6</i>).....	42
2.6.1. Frecuencia de ocurrencia del accidente primario.....	42
2.6.2. Cálculo de las consecuencias del accidente primario.....	43
2.7. Cálculo de los vectores de intensificación (<i>Cuadro No.7</i>).....	44
2.8. Comparación de los vectores de intensificación con los valores umbrales (<i>Cuadro No.8</i>).....	45
2.9. ¿Es posible la propagación? (<i>Cuadro No.9</i>).....	45
2.10. Identificación de las unidades destino con potencial de intensificación (<i>Cuadro No.10</i>).....	45
2.11. Cálculo de los valores Probit en cada unidad destino (<i>Cuadro No.11</i>).....	45
2.12. Clasificación relativa del riesgo de efecto dominó en cada unidad destino (<i>Cuadro No.12</i>).....	47
2.13. Estimación de las probabilidades de daños en cada unidad destino (<i>Cuadro No.13</i>).....	48
2.14. Estimación del estado de daños e intensidad de pérdidas en cada unidad destino.....	48
2.15. Identificación y cálculo de los vectores de intensificación en cada unidad destino (<i>Cuadro No.15</i>).....	49
2.16. Cálculo de consecuencias de los vectores de intensificación en cada unidad destino (<i>Cuadro No.16</i>).....	49
2.17. ¿Es posible un nivel de intensificación superior? (<i>Cuadro No.17</i>).....	50
2.18. ¿Se analizaron todos los eventos primarios? (<i>Cuadro No.18</i>).....	50
2.19. Cálculo de la frecuencia y consecuencias totales (<i>Cuadro No.19</i>).....	50
Cálculo de la frecuencia del ED.....	50
Cálculo de las consecuencias del ED.....	51
2.20. Representación gráfica de los perfiles de riesgo (<i>Cuadro No.20</i>).....	52
Conclusiones parciales.....	52

CAPÍTULO III. Aplicación de la metodología para el análisis cuantitativo de riesgo, considerando la intensificación de los daños por efecto dominó: Caso de estudio Almacén tecnológico de GLP, Santa Clara	53
3.1. Definición del alcance y contexto del análisis de riesgo cuantitativo.....	53
3.1.1. Área de riesgo AR I: Descarga y almacenamiento de GLP.....	55
3.1.2. Área de riesgo AR II: Nave de operaciones.....	59
3.1.3. Área de riesgo AR III: Infraestructura y dirección del grupo.....	59
3.2. Identificación de peligros o factores de riesgo.....	60
3.3. Identificación y clasificación de las unidades creíbles de accidente mayor.....	60
3.4. Especificación de la unidad primaria.....	61
3.5. Definición de los umbrales de intensificación.....	61
3.6. Análisis de frecuencia y consecuencias del accidente primario.....	61
3.6.1. Frecuencia de ocurrencia del accidente primario.....	61
3.6.2. Cálculo de las consecuencias del accidente primario.....	61
3.7. Cálculo de los vectores de intensificación.....	63
3.8. Comparación los vectores de intensificación con los valores umbrales.....	64
3.9. ¿Es posible la propagación?.....	65
3.10. Identificación de las unidades destino con potencial de intensificación.....	65
3.10.1. Unidades destino del accidente primario.....	65
3.10.2. Unidades destino del accidente secundario.....	65
3.11. Cálculo de los valores Probit en cada unidad destino.....	66
3.11.1. Unidades destino del accidente primario.....	66
3.11.2. Unidades destino del accidente secundario.....	66
3.12. Clasificación relativa del riesgo de efecto dominó en cada unidad destino.....	66
3.12.1. Unidades destino del accidente primario.....	66
3.12.2. Unidades destino del accidente secundario.....	67
3.13. Estimación de las probabilidades de daños en cada unidad destino.....	67
3.13.1. Unidades destino del accidente primario.....	67
3.13.2. Unidades destino del accidente secundario.....	68
3.14. Estimación del estado de daños e intensidad de pérdidas en cada unidad destino.....	68
3.14.1. Unidades destino del accidente primario.....	68
3.14.2. Definición de los escenarios probables de las unidades secundarias.....	68
3.14.3. Unidades destino del accidente secundario.....	69
3.14.4. Definición de los probables escenarios de las unidades terciarias.....	69
3.15. Identificación y cálculo de los vectores de intensificación en cada unidad destino.....	69
3.15.1. Unidades destino del accidente primario.....	69
3.15.2. Unidades destino del accidente secundario.....	72
3.16. Cálculo de consecuencias de los vectores de intensificación en cada unidad destino.....	73
3.16.1. Unidades destino del accidente primario.....	73
3.16.2. Unidades destino del accidente secundario.....	74
3.17. ¿Es posible un nivel de intensificación superior?.....	74
3.17.1. Unidades destino del accidente secundario.....	74
3.18. ¿Se analizaron todos los eventos primarios?.....	75
3.19. Cálculo de la frecuencia y consecuencias totales.....	75
3.19.1. Cálculo de la frecuencia.....	75
3.19.2. Cálculo de las consecuencias totales.....	76
3.20. Representación gráfica de los perfiles de riesgo.....	78
Conclusiones parciales.....	79
CONCLUSIONES.....	80
RECOMENDACIONES.....	81
BIBLIOGRAFÍA.....	82
ANEXO I. DEFINICIONES Y CONCEPTOS GENERALES.....	82
ANEXO II. ANÁLISIS HISTÓRICO DE ACCIDENTES.....	82
ANEXO III. PROYECCIÓN DE PROYECTILES O FRAGMENTOS.....	82



Introducción

INTRODUCCIÓN

A partir del análisis histórico de los accidentes mayores reportados en las bases de datos internacionales, (*Darbra, 2010*) y (*Necci et al., 2015*), aseguran que muchos de los accidentes mayores que han ocurrido en instalaciones químicas son el resultado de un inesperado efecto dominó (ED).

Cuando un accidente ocurre dentro de una planta de proceso sus efectos físicos (sobrepresión, radiación térmica y el impacto de fragmentos generados por la explosión) generalmente dañan al equipamiento circundante lo cual puede conducir a pérdidas de contención y escenarios de accidentes adicionales, (*Spoelstra et al., 2015*) y (*Jujuly et al., 2015*).

El impacto de un accidente dominó depende en gran medida del diseño y naturaleza de la instalación, así como de la presencia de las salvaguardas o sistemas de seguridad adecuados, (*Talarico et al., 2015*).

Un efecto dominó se representa como el efecto acumulativo de una cadena de eventos no deseados, que acarrear graves y a menudo es visto como sinónimo de una cascada de accidentes, en que las consecuencias y la frecuencia del accidente precedente son incrementadas, según (*Reniers, 2010*) puede ser clasificado en dos categorías; ED interno y ED externo, el ED interno es reconocido como la intensificación del accidentes dentro de las fronteras de una misma industria, mientras que en el externo la intensificación sobrepasa las fronteras de la industria en que ocurre el accidente.

Un ejemplo, que puede servir de base para el valorar la importancia que tiene la evaluación del ED y las medidas que se adoptan internacionalmente para minimizar sus posibles daños, es la Seveso-III (*Directiva 2012/18/EU*), esta directiva en su artículo No.9, especifica las acciones que deben ser tomadas para prevenir y limitar los impactos de accidentes químicos mayores y deja explícitamente definido que el análisis de riesgo y los programas de seguridad en las entidades industriales deben hacerse teniendo en cuenta al ED, tanto dentro de una misma instalación como entre instalaciones vecinas, con el fin de lograr programas con un nivel de seguridad superior.

Por su parte, las autoridades y especialistas industriales también se asegurarán de que el personal sea correctamente informado de los riesgos y que los servicios de rescate y los bomberos tengan toda la información necesaria para manejar de la mejor y más eficaz forma posible un accidente de este tipo (*European Commission, 1996*).

Queda claro, que el ED debe tenerse en cuenta en los análisis de riesgo de las industrias de proceso, pero en ninguna normativa se especifica cómo debe ser analizado ni el nivel de detalle con el que debe hacerse, por lo que mayormente la inclusión del ED en los análisis de riesgo se hace de manera cualitativa lo que conduce a valoraciones subjetivas y resulta dependiente de suposiciones que simplifican tanto el problema real, que hacen que los resultados sean cuestionables o poco confiables, (*Ibarra y col., 2014*), es por ello que las investigaciones recientes están dirigidas en lo fundamental a desarrollar y validar herramientas que cuantifiquen el riesgo asociado con el ED.

Una revisión bibliográfica detallada sobre el uso de técnicas cuantitativas para la valoración del ED reporta la existencia de numerosos modelos cuantitativos (*Pasmana and Reniers, 2013*) y (*Baes et al., 2013*), resultando común que estas técnicas traten los escenarios con ED en evaluaciones independientes, es decir fuera del análisis cuantitativo de riesgos clásico (*QRA, por sus siglas en inglés*), aunque muestran que, efectivamente, el ED pudiera ser tratado en el marco de un *QRA*, pero no brindan ninguna guía de cómo este efecto pueda ser incorporado en el análisis integral.

Los estudios realizados por (*Cozzani et al., 2006*) y (*Abdolhamidzadeh et al., 2010*) revelaron que el no considerar el ED en el *QRA* conlleva a que el riesgo no sea evaluado en su magnitud real. Todo lo cual justifica que en la actualidad, ninguna valoración de riesgo puede ser considerada completa sin incluir el análisis del ED (*Reniers and Cozzani, 2013*).

En trabajos científicos recientes, (*Nomen et al., 2014*) y (*Kardell and Lööf, 2014*), ya exponen resultados del análisis del ED en el marco del *QRA* convencional, pero no brindan una guía metodológica de cómo se debe realizar dicho análisis.

El **problema científico** de este trabajo se fundamenta en la no disponibilidad de una herramienta que permita que el riesgo del ED sea cuantitativamente analizado dentro de las fronteras de un *QRA* convencional, sin afectar significativamente la forma y el tiempo en que estos análisis se realizan, y que a su vez garantice una mejor identificación de las partes más vulnerables del sistema, facilitando la implementación de medidas de seguridad adecuadas en las instalaciones químicas.

Para solucionar el problema científico, se plantea como **hipótesis** que, es posible lograr una metodología integral y flexible que permita aplicar cualquiera de las técnicas de análisis de riesgo cuantitativo tradicionales, sin depender de complejos algoritmos, para la evaluación integral de la cadena de eventos del efecto dominó en todos los escenarios probables de accidente mayor.

Objetivo General:

Desarrollar una metodología que permita el análisis cuantitativo de riesgo en la industria química, considerando la intensificación de los daños en accidentes mayores por efecto dominó.

Objetivos Específicos:

1. Evaluar el estado del arte relacionado con el Análisis de Riesgo Cuantitativo en la industria química y la posible inclusión de la evaluación de efecto dominó en su estructura analítica, a partir de una profunda revisión y análisis bibliográfico.
2. Fundamentar una propuesta metodológica con inclusión de nuevos métodos y procedimientos que permitan el análisis del ED, integrado en la estructura del *QRA* convencional.

3. Validar la funcionalidad de la metodología propuesta en una instalación real, adecuando cada uno de los pasos dentro de los límites de tiempo que puedan ser considerados razonables para un *QRA* y comprobando si la estructura propuesta garantiza el flujo necesario para el análisis de riesgo incluyendo el ED.

Para lograr una mejor organización del **informe de investigación**, se define la siguiente **estructura**: Resumen; Introducción; Tres Capítulos (se detallan a continuación); Conclusiones; Recomendaciones; Bibliografía y Anexos.

CAPÍTULO I. Estudio bibliográfico

Se evalúa el estado del arte relacionado con el Análisis de Riesgo Cuantitativo en la industria química y la posible inclusión de la evaluación de efecto dominó en su estructura analítica, lo que permite fundamentar la nueva metodología desarrollada.

CAPÍTULO II. Metodología para el análisis cuantitativo de riesgo de accidentes mayores probables en la industria química, considerando la intensificación de los daños por efecto dominó.

Se propone una nueva metodología que integra en el *QRA* convencional con la evaluación de la influencia del ED en el aumento de la frecuencia e intensificación de las consecuencias de los accidentes mayores probables en la industria química, tomando como base las fortalezas de los métodos de análisis publicados en las numerosas referencias estudiadas.

CAPÍTULO III. Aplicación de la metodología para el análisis cuantitativo de riesgo, considerando la intensificación de los daños por efecto dominó: Caso de estudio Almacén tecnológico de GLP, Santa Clara

Se aplica la nueva metodología en una instalación real, evaluando su funcionalidad y adecuación de cada uno de sus pasos dentro de los límites de tiempo que puedan ser considerados razonables para un *QRA*, asimismo se comprueba que la estructura metodológica propuesta garantiza el flujo necesario para el análisis de riesgo incluyendo el ED.



Capítulo I

CAPÍTULO I. Estudio bibliográfico

En este capítulo, con el objetivo de fundamentar la metodología que se propone desarrollar, y sobre la base de una profunda revisión bibliográfica, se evalúa el estado del arte relacionado con el Análisis de Riesgo Cuantitativo (*QRA*, por sus siglas en inglés) en la industria química y la posible inclusión de la evaluación del efecto dominó (ED) en su estructura analítica.

Para ayudar a la comprensión de los principales términos y conceptos que se asumen y utilizan en este estudio se elaboró el **Anexo I**.

1.1. Análisis de riesgo cuantitativo en la industria química

Como es conocido cualquier industria que maneje sustancias peligrosas está por ley obligada a valorar sus riesgos para prevenir la ocurrencia de un accidente mayor, y el *QRA* es la metodología que 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 medioambiente.

En la *Figura 1.1* se presenta un diagrama de flujo que ilustra el proceso que define el *QRA* convencional y a continuación de la figura se describen cada uno de los pasos del análisis.

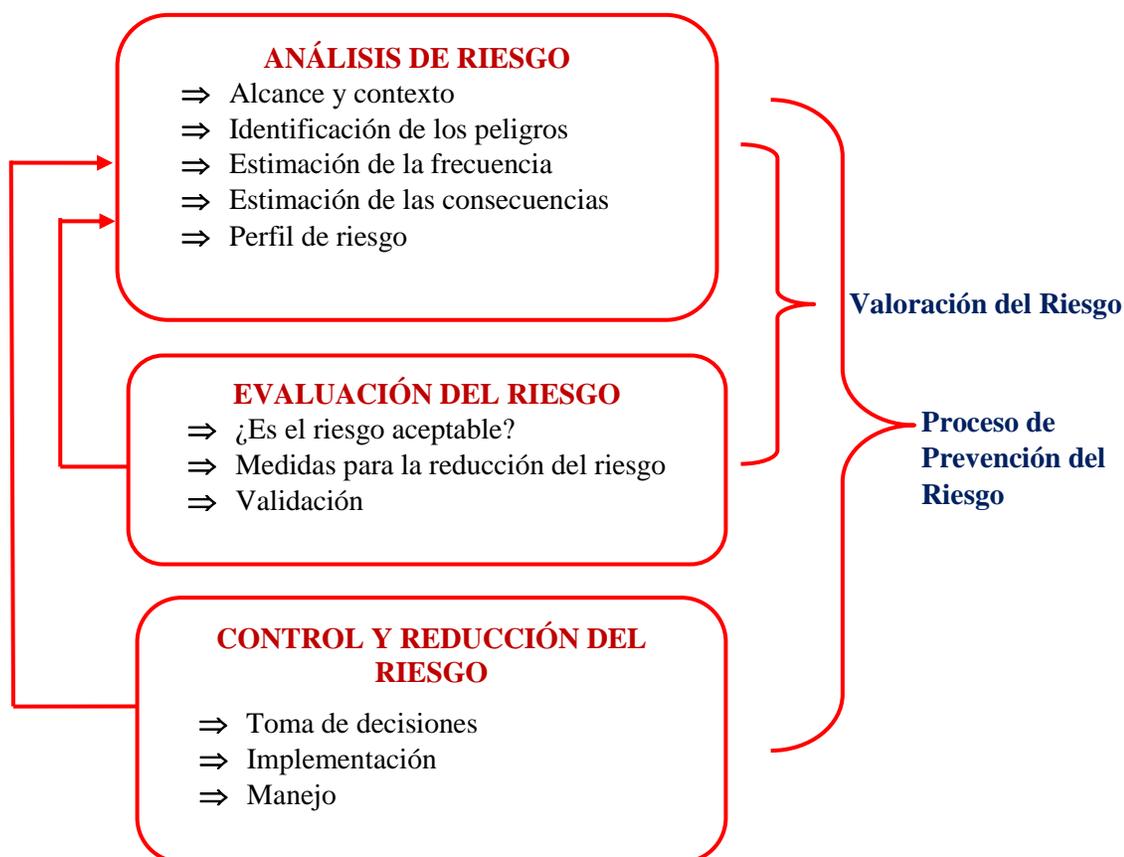


Figura 1.1. Pasos que definen un típico QRA, (Kardell and Lööf, 2014)

1.1.1. Alcance y contexto del análisis

Todas las partes interesadas en un proyecto deben llegar a un acuerdo sobre el área de interés y el nivel de detalle en el que se basará el análisis (*Pasmana and Reniers, 2013*). El contexto del análisis deberá soportarse en una serie de aspectos, como: la descripción general de la instalación y de los procesos; planos con la ubicación en planta de los equipos, sistemas de protección tanto pasivos como activos, así como las distancias entre equipos y las fronteras del área seleccionada; diagramas de flujo de los procesos con una descripción detallada del equipamiento y la caracterización de las sustancias peligrosas involucradas, ya sean materias primas o productos terminados, qué cantidad y cómo son procesadas.

Asimismo, es importante definir las simplificaciones y factores de riesgo a descartar en el estudio, y la necesidad o no de valorarlos, como nuevos escenarios, en análisis independientes, con el objetivo de que quede definida su significación y con ello minimizar la confusión en la interpretación de los resultados por evaluadores externos.

1.1.2. Identificación de los peligros

Para conseguir que una instalación industrial opere de forma segura y continuada, es fundamental disponer de un sistema que gestione el riesgo asociado a sus procesos siendo el primer requisito para ello la implementación de técnicas que permitan la identificación, evaluación y control de los peligros que pueden aparecer en dicha instalación (*Ibarra y col., 2014*).

Estas técnicas, según (*CCPS, 1992*), reciben el nombre de técnicas *PHA* (*por sus siglas en inglés, Process Hazard Analysis*) y su aplicación permite prevenir los accidentes que pueden suceder en las instalaciones industriales y asegurar la productividad de las mismas.

La mayoría de los estudios de análisis de riesgo de los procesos son realizados por equipos de especialistas, en (*Baybutt, 2015*) se reporta una investigación muy completa al respecto, donde se define la composición y principales cualidades tanto de los miembros como de la dirección del equipo, así como las actividades a realizar y la interacción con los directivos de las entidades que se evalúan.

En un *QRA* la identificación de peligros es el paso de mayor significación, si sólo uno de los factores de riesgo más importantes es pasado por alto resulta evidente que el objetivo principal del análisis no será cumplido a cabalidad. El tiempo limitado con que se cuenta para realizar el *QRA* no permite que todas y cada una de las fuentes de riesgo sean evaluadas correctamente, por lo que resulta muy importante identificar los escenarios de riesgo más representativos, aquellos que puedan abarcar el mayor rango de las posibles amenazas, que conlleven a un accidente mayor, esta idea puede llevarse a cabo realizando una valoración preliminar del riesgo (*Directiva 2012/18/EU*).

En la *Tabla 1.1* se relacionan un grupo de las principales técnicas de identificación de peligros y la recomendación para su aplicación, su selección dependerá en gran medida de la experticia del equipo de trabajo y los objetivos que se pretendan alcanzar en el estudio de seguridad. Los nombres de las técnicas en idioma inglés son los originales, la traducción al español son asumidas por el autor de diferentes fuentes o interpretación propia.

Tabla 1.1. Principales técnicas para identificar peligros o factores de riesgo. (Ibarra y col., 2014)

TÉCNICAS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS	IDENTIFICA PELIGROS EN:
<i>HAZard and OPerability Analysis (HAZOP)</i> . Análisis de Operabilidad y Peligros	Procesos
<i>What if?. ¿Qué pasa si?</i>	Procesos
<i>Checklist</i> . Lista de Chequeo	Procesos
<i>Standard/Codes of practice/ Literature Review</i> /Análisis Histórico	Procesos
<i>Hazard Identification Study (HAZID)</i> . Estudio de Identificación de Peligros	Procesos
<i>Índices de Seguridad (Dow F/EI & Mond)</i>	Procesos
<i>Preliminary Hazard Analysis (PrHA)</i> . Análisis Preliminar de Peligros	Procesos
<i>Hazard Analysis and Critical Control Point (HACCP)</i> . Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control	Procesos
<i>Concept Hazard Analysis (CHA)</i> . Análisis de Peligro-Concepto	Procesos
<i>Concept Safety Review (CSR)</i> . Revisión de Seguridad-Concepto	Procesos
<i>Functional Integrated Hazard Identification (FIHI)</i> . Identificación Funcional e Integrada de Peligros	Procesos
<i>The Sequentially Timed Event Plotting Technique (STEP)</i> . Técnica de pasos	Procesos
<i>Inherent Hazard Analysis</i> . Análisis de Peligro Inherente	Procesos
<i>Functional Analysis of Failure Modes and Effects (FMEA)</i> . Análisis Funcional y Modos de Fallos y Efectos	Equipo
<i>Failure Modes, Effects and Critically Analysis (FMECA)</i> . Modos de Fallos, efectos y Análisis de criticidad	Equipo
<i>Root Cause Analysis</i> . Análisis de Causa Raíz	Equipo
<i>Analysis of Cause and Effect</i> . Análisis de Causa y Efectos	Equipo
<i>Safety Review</i> . Revisión de Seguridad	Equipo
<i>Maintenance and Operability Study (MOP)</i> . Estudio de Mantenimiento y Operabilidad	Equipo
<i>Sneack Analysis</i> . Análisis del Informante	Equipo
<i>Pattern Search Method</i> . Método de Patrón de Búsqueda	Factor humano
<i>Task Analysis</i> . Análisis por Tareas	Factor humano
<i>Relative Ranking</i> . Clasificación Relativa	No se define
<i>Brainstorming</i> . Tormenta de ideas	No se define
<i>Interviews</i> . Entrevistas	No se define

La selección de la técnica *PHA* adecuada, estará fuertemente ligada a la complejidad del objeto analizado (Marhvilas et al, 2011). Por ejemplo, para una planta de proceso, que no sea compleja o que no presente peligro mayor inminente en el manejo de sustancias peligrosas la selección de la técnica *What if?*, resulta suficiente como se demuestra en (Kirschsteiger, 1998) e (Ibarra y col., 2015). Mientras que para las instalaciones complejas donde

el procesamiento de las sustancias peligrosas resulta significativo, se recomienda utilizar una técnica de análisis de riesgo profunda, tal como el *HAZOP* (Ibarra y col., 2015a), (Guo and Kang, 2015), Baybutt, (2015a) y (Ávila et al., 2013).

A menudo, para garantizar un nivel satisfactorio de identificación de peligros lo recomendado es el uso de una combinación de varias técnicas (Ibarra y col., 2014), según las directrices estadounidenses para el *QRA* en Procesos Químicos se recomienda un método estructurado, como *HAZOP* y *AMFE*, como complemento de los métodos más generales, tales como *Checklist*, (CCPS, 1989). Para una guía de qué técnica *PHA* se debe utilizar y cuándo, se recomienda acudir a las Directrices para los procedimientos de evaluación del peligro, propuestas en (CCPS, 1992) y (Mannan, 2005).

En (Ibarra y col., 2015) e (Ibarra y col., 2015a), se proponen los **peligros** que deben ser identificados en un *QRA* de accidente mayor; los asociados a las sustancias industriales que son almacenadas o procesadas en cantidades superiores a los valores umbrales definidos para el nivel de riesgo por unidad de masa de la sustancia en cuestión; en función de las características propias de las sustancias presentes en el proceso (materias primas, productos intermedios, productos finales, subproductos, aditivos, catalizadores, corrientes de desecho) y los peligros relacionados con los materiales, equipos y sus condiciones de operación (altas presiones, altas temperaturas, asfixia, salpicaduras de aceite caliente o contactos con vapor, superficies calientes, materiales criogénicos, alta energía cinética, alto voltaje/ corriente/electricidad estática).

Los **peligros** o factores de riesgo se considerarán para un *QRA* de accidente mayor siempre que puedan generar **riesgo de incendio** (de charco, de dardo, de llamarada, bola de fuego, otros); **explosión** (físicas y químicas, confinadas o no confinadas, *BLEVE*, por polvo, descomposición térmica, reacciones fuera de control) o **fuga tóxica** (emisión o escape de sustancias nocivas y/o tóxicas para la salud de las personas o para el medio ambiente) (Ibarra y col., 2015a).

En (Ibarra y col., 2015) se recomienda que, en el proceso de identificación de los peligros, se consideren todos los posibles escenarios que incluyan fugas que conduzcan a pérdidas de contención; que se analicen todos y cada uno de los equipos, bombas y tuberías de la instalación; que se involucre personal de diferentes especialidades para identificar las fuentes de riesgo con las mayores consecuencias probables; que se conozcan las medidas de seguridad existentes en las diferentes etapas de los accidentes; que identifiquen los peligros que tienen potencial para propagarse e intensificar sus consecuencias y frecuencia y definir para cada escenario representativo, su frecuencia estimada, según reportes de la literatura.

1.1.3. Estimación de la frecuencia

Para la estimación de la frecuencia en un *QRA* se utilizan convencionalmente varios métodos bien documentados en la literatura. Dentro de ellos, uno de los más utilizados es el **árbol de eventos**, en (Vilchez et al., 2011) y (Rajakarunakaran et al., 2015) se brinda una amplia información, con datos precisos, sobre la utilización de este método en la estimación de la frecuencia de escenarios de fugas de varias sustancias peligrosas, incluido el GLP.

Otro método establecido es el análisis **Bow tie**, (*Yaneira et al., 2014*) lo utiliza tanto para la identificación de peligros como para la estimación de la frecuencia, mientras que (*Pitblado and Weijand, 2014*) describe los errores más comunes que se cometen en su aplicación y propone las formas de rectificarlos.

Por su parte, (*Kirchsteiger, 1998*) ya había argumentado la utilidad de los dos métodos de análisis, anteriormente expuestos, en la modelación del comportamiento de la frecuencia de fallo de las industrias de procesos. Recientemente se han introducido métodos avanzados de gran flexibilidad que permiten una mejor interpretación del problema que representa la estimación de la frecuencia, basados en las **redes bayesianas** (*Cheng et al., 2014*).

Independientemente del método seleccionado, para realizar una estimación fiable de la frecuencia de ocurrencia de los accidentes, resulta crucial disponer de datos bien fundamentados de las tasas de fallos. Generalmente, los sistemas de la industria química presentan un alto grado de complejidad, por lo que para el *QRA* en estos casos es requisito previo hacer simplificaciones o suposiciones, lo que contribuye al incremento de las incertidumbres, y conlleva a que la fiabilidad de los resultados pudiera ser cuestionable.

Para tomar en cuenta estas incertidumbres es preferible realizar un análisis de sensibilidad de los factores críticos, aquellos que más afecten o influyan en los resultados. En (*Abdolhamidzadeh et al., 2009*) se recomienda un método bien conocido, la simulación de **Monte Carlo**, para tener en cuenta las incertidumbres. Este método se implementa a menudo en el marco del *QRA* y permite analizar una gran variedad de permutaciones de incertidumbre simultáneamente (*Arunraj et al., 2013*) y (*Rezaie et al., 2007*). Por otra parte, (*Milazzo et al., 2015*) en su estudio *QRA* aplicado a pérdidas de contención presenta una valoración sobre el impacto de la incertidumbre en los resultados.

La limitación fundamental de los métodos (*redes bayesianas* y *Monte Carlo*) está dada por la necesidad de implementar complejos sistemas de cómputo adaptados a las diferentes configuraciones industriales (son particularizados, no es posible su generalización), estas implementaciones no siempre están disponibles o en el mejor de los casos existen pero con precios prohibitivos.

Teniendo en cuenta lo anterior, se recomienda, para la aplicación de la metodología que se propone en este trabajo de tesis, obtener los valores de probabilidad del accidente mayor, de forma alternativa a partir de datos genéricos disponibles en diferentes fuentes bibliográficas o mediante la realización de un análisis de **árbol de eventos o un árbol de fallos** para cada caso particular en estudio.

1.1.4. Análisis de consecuencias

Al realizar un análisis de las consecuencias en una instalación química, el primer paso es identificar y evaluar los escenarios de fuga, en este contexto (*Delvosalle et al. 2006*) presenta una metodología para la identificación de escenarios accidentales de referencia en la industria de procesos, partiendo de importantes datos como la velocidad de liberación, la duración de la fuga, la cantidad de sustancia peligrosa que se libera, así como las condiciones ambientales en el momento del evento, coincidente con las consideraciones propuestas en (*CCPS, 1999*). El siguiente paso en el análisis de consecuencias depende de la peligrosidad de la sustancia liberada, si es

inflamable o tóxica. En las emisiones tóxicas se evalúa el modelo de dispersión y los efectos tóxicos de la sustancia liberada, para lo que puede recomendarse el *software ALOHA 5.4.1 (2007)*. Si la sustancia liberada es inflamable, el evento peligroso puede manifestarse en forma de incendio y/o explosión.

Incendio: Se evalúan los efectos de la **radiación térmica**. El método a utilizar para evaluar la radiación térmica emitida dependerá del tipo de incendio (incendio de charco, dardo de fuego, llamarada o bola de fuego). Existen varias herramientas computacionales para el análisis de las consecuencias, *por ejemplo, ALOHA, PHAST, HAZDIG*, y otras.

Explosión: Se evalúan los efectos de **sobrepresión** (onda de choque y/o proyección de fragmentos) mediante modelos de puntos de origen o puntos de fuentes, *por ejemplo, (Díaz 2006)* propone los modelos TNT equivalente y *(Mannan, 2005)* los modelos multi-niveles (multi-energía y Baker-Strehlow), entre otros. La explosión *BLEVE*, fenómeno muy común y de consecuencias catastróficas en la industria química, también puede ser evaluada con herramientas computacionales, tales como el *software ALOHA 5.4.1. (2007)*.

En varios trabajos como *(Masum et al., 2015)*, se utiliza la simulación dinámica computacional de un fluido en 3D (*CFD, por sus siglas en inglés*), en este caso se aplica a un incendio de charco de gas licuado natural (GLN) utilizando para ello el *software ANSYS-14*, este modelo resuelve las ecuaciones fundamentales de la dinámica de los fluidos y utiliza además otros modelos y herramientas computacionales para definir las características del incendio de charco, y para definir la magnitud de la radiación térmica utiliza **Monte Carlo**.

Investigaciones más recientes sobre el análisis de las consecuencias se podrán encontrar en trabajos como: *(Kadri and Chatelet. 2013); (Tong et al., 2013); (Milazzo et al., 2015), (Zhang et al., 2015b), (Salzano y Basco, 2015) y (Zhang et al., 2015 a)*.

1.1.5. Presentación del perfil de riesgo

El riesgo individual y social es conceptualizado y comparado su comportamiento en diferentes países por *(Pitblado et al., 2012)*. Ambos riesgos se basan en los mismos parámetros de análisis, frecuencia y consecuencia de los accidentes; sólo se diferencian en las formas de presentarse.

El **riesgo individual** es el que corre una persona que este expuesta a una cierta distancia de la fuente de peligro y por lo general se expresa como riesgo anual de muerte y se presenta como contornos de iso-riesgo según *(Renjith and Madhu, 2010)*. La *Figura 1.2* muestra la representación del **riesgo individual** utilizado por *(Nomen et al, 2014)*.

El **riesgo social** es el referido a un grupo de personas expuestas y por lo general se presenta en una curva FN, donde se traza la Frecuencia anual esperada (F) vs. Número de víctimas (N), *Figura 1.3* muestra un *ejemplo (Wood, 2010)*.

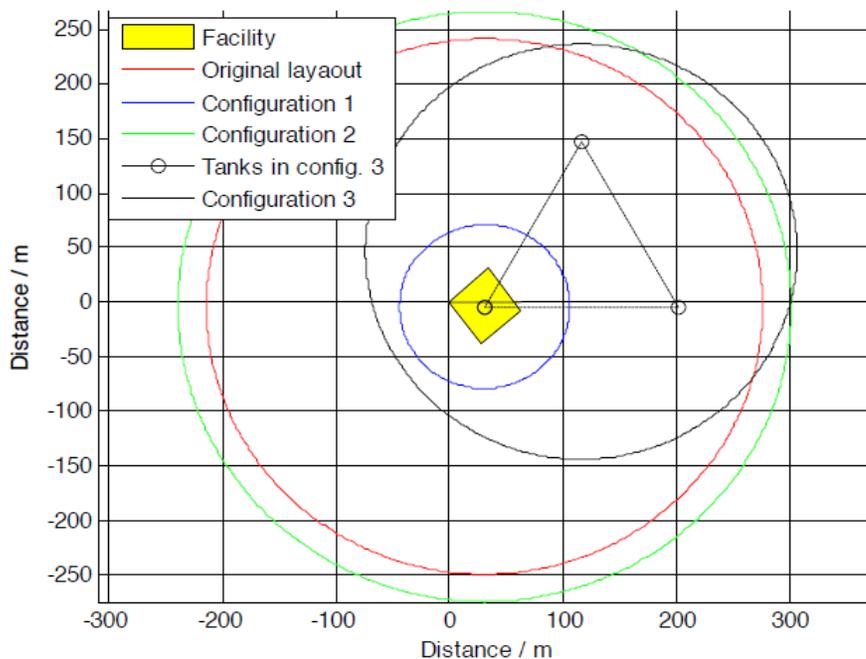


Figura 1.2. Ejemplo de curva de iso-riesgo, *riesgo individual* (Nomen et al, 2014)

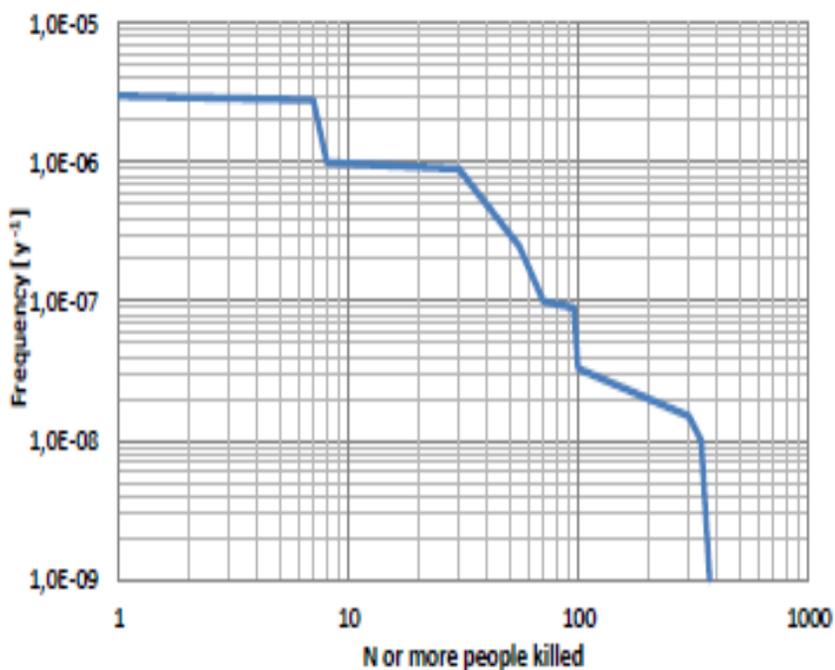


Figura 1.3. Ejemplo de curva FN, *riesgo social* (Wood, 2010)

En (Tugnoli et al. 2011) y (Mentzer et al. 2014) se propone resumir los resultados de un QRA en una matriz de riesgo donde las consecuencias pueden ser de tipo ambiental, económico o humano.

La ventaja de este método es la facilidad para clasificar los diferentes accidentes y sirve de base para decidir dónde se tomarán las medidas de reducción de riesgos, en la Figura 1.4 se muestra un ejemplo de matriz publicada en (Davidsson et al., 2003).

>Once a year					
Once every 1-10 years					
Once every 10-100 years					
Once every 100-1000 years					
<Once every 1000 years					
Human	Temporary mild discomfort	Some people injured, enduring discomfort	Some serious injuries	Some fatalities and several serious injuries	Several fatalities and tens of injuries
Environmental	No sanitation, little dispersion	Easy sanitation, little dispersion	Easy sanitation, large dispersion	Severe sanitation, little dispersion	Severe sanitation, large dispersion
Economical	<0,01 EUR million	0,01-0,1 EUR million	0,1-1 EUR million	1-2 EUR million	>2 EUR million

Figura 1.4. Ejemplo de una Matriz de Riesgo (Davidsson et al., 2003)

Para los **daños materiales** se recomienda representar los radios de afectación, *por ejemplo*, obtenidos con el *software* ALOHA, sobre un plano de planta de la instalación en estudio, donde se ubiquen todos los equipos e instalaciones que pueden ser dañadas, lo que permitirá determinar el alcance de los vectores de afectación en cada caso (perfil de riesgo).

1.2. El efecto dominó como fenómeno de intensificación del riesgo

Siempre que ocurre un accidente mayor, existe el riesgo de daño al equipamiento o instalaciones que se encuentra a su alrededor debido a los efectos físicos del evento inicial, lo que puede generar eventos secundarios e incluso de niveles superiores. Este fenómeno es conocido como **efecto dominó** (ED) y a los efectos físicos causantes de la cadena de eventos, se les denomina **vectores de intensificación** (radiación térmica, sobrepresión y proyección de fragmentos).

No obstante a esta interpretación generalizada, no hay un consenso científico en la definición universal de ED y de los elementos que lo caracterizan, por lo que se hace necesario, para los objetivos de esta investigación, asumir una posición dentro de las múltiples definiciones publicadas, antes de abordar los métodos de evaluación cuantitativa del fenómeno ED.

1.2.1. Efecto dominó

En (Reiners and Cozzani. 2013) se identifican algunos elementos necesarios para que tenga lugar el ED (Tabla 1.2). Para facilitar la interpretación del fenómeno sólo se refieren las características de escenarios de órdenes primarios y secundarios, pero todas son aplicables a eventos de órdenes superiores de propagación.

Tabla 1.2. Elementos necesarios para que un evento pueda ser considerado ED, (Reniers and Cozzani, 2013)

ELEMENTO	DEFINICIÓN
ESCENARIO PRIMARIO	Escenario donde el accidente primario inicia un ED, propagándose e intensificándose al afectar otras unidades de proceso o de almacenamiento desencadenando uno o varios escenarios de accidentes secundarios.
ESCENARIO SECUNDARIO	Escenario donde el accidente es causado por el impacto de al menos uno de los vectores de intensificación generados por el accidente primario.
PROPAGACIÓN	En un <u>ED interno</u> , la propagación tiene lugar dentro de la misma unidad o grupo de equipos. En un <u>ED externo</u> , la propagación indica la implicación de otras unidades o grupos de equipos que se localizan fuera de las fronteras de la instalación donde se provocó el accidente primario.
INTENSIFICACIÓN	La intensificación de las consecuencias de un evento no deseado.
VECTOR DE INTENSIFICACIÓN	Efectos físicos (radiación térmica, sobrepresión y/o proyección de fragmentos) generados por el accidente primario.

En (Reniers and Cozzani, 2013) se considera, que el definir un ED no es exactamente un ejercicio académico, ya que para ello se requiere que deban ser analizados además varios estándares técnicos y legislativos. A partir del análisis de 15 definiciones diferentes, estos mismos autores, definen el **efecto dominó**, como:

Un accidente donde un evento primario no deseado se propague dentro de un equipamiento (temporalmente) y/o a los equipos vecinos (espacialmente), secuencialmente o simultáneamente, desencadenando uno o más eventos no deseados secundarios, pudiendo desencadenar además eventos no deseados de un orden superior, resultando que el conjunto de las consecuencias sea mucho más severo que las del evento primario que le dio inicio.

Independientemente del concepto, queda claro que para que un accidente pueda ser considerado como ED, deben verse incrementadas sus consecuencias por la cadena de eventos. Los eventos secundarios o de mayor grado que posean un potencial de intensificación menor que el del evento primario serán excluidos del análisis, al no incrementar el riesgo total.

1.2.2. Escenario primario

Los principales escenarios primarios que pueden dar inicio a un ED, son: incendio de charco (*pool fire*); dardo de fuego (*jet fire*); bola de fuego (*fireball*); llamarada (*flash fire*); explosión mecánica; explosión confinada; *BLEVE*; escape tóxico.

En la *Tabla II.6 y II.7* del **Anexo II** se relacionan las causas generales probables de un evento primario y el porcentaje que representa del total de eventos evaluados por (*Chen et al., 2012*) y (*Darbra et al., 2010*), respectivamente, a partir de los reportes en bases de datos de accidentes en la industria de procesos.

Según (*Kadri and Chatelet. 2013*), las fuentes potenciales de ED son de naturaleza diferente y también están vinculadas a varios eventos de iniciación, en general se diferencian teniendo en cuenta la naturaleza de los riesgos que originan el ED, dos fuentes: provenientes de riesgos naturales y provenientes de riesgos antropogénicos, estas últimas pueden partir de riesgos tecnológicos; riesgos organizativos no intencionales o provenientes de riesgos intencionales.

El propósito de estudio del ED toma en cuenta la combinación de estas dos fuentes de riesgo y es por lo tanto posible, proponer la descomposición (no separada o inconexa) de la naturaleza de los riesgos y por lo tanto la clasificación de los eventos iniciales, como:

- a) Orígenes naturales: *Climático* (incendios forestales, lluvias e inundaciones, avalanchas, huracanes, tormentas, tornados, otros); *Geológico* (deslizamientos de tierra y terremotos, tsunamis, erupciones volcánicas y otras).
- b) Orígenes humanos: *Organizativo* (fallas por mala manipulación o falta de acción ante emergencias, por defectos en el diseño o en los procedimientos). *Intencionales* (robos, sabotajes y/o acciones por venganza, daños por cualquier tipo de ataques).
- c) Orígenes tecnológicos: *Incendios, explosiones o escapes tóxicos*.

1.2.3. Unidades destino

Una vez ocurrido el accidente primario se hace necesario determinar hacia cual o cuales de las unidades vecinas este podrá propagarse, de ser posible la propagación, y son estas precisamente las unidades a las que denominaremos como unidades destino.

Para lograr una mejor identificación de las unidades destino se hace necesario conocer cuál sería, en dependencia del accidente primario, la cadena de accidentes con mayores posibilidades de desarrollo. Y la probabilidad de intensificación a niveles superiores de propagación.

1.2.4. Definición de vectores de intensificación

Se entiende por **vector de intensificación** los efectos físicos de un evento (radiación, sobrepresión, proyección de fragmentos) responsables de la intensificación de los daños sobre otras unidades del proceso. En el trabajo presentado por (*Necci et al., 2015*) se brinda una detallada información sobre los vectores de intensificación y (*Cozzani et al., 2006*) relaciona los posibles eventos secundarios de un ED vinculados a los vectores de intensificación que siguen al escenario primario. La *Tabla 1.3* resume los escenarios secundarios esperados para diferentes eventos primarios y sus respectivos vectores de intensificación.

Tabla 1.3. Vectores de intensificación y escenarios secundarios esperados para diferentes eventos primarios (Cozzani et al. 2006)

Evento Primario	Vector de intensificación	Escenario secundario esperado ^(a)
Incendio de charco (pool fire)	Radiación, daño por el fuego	Dardo de fuego, incendio de charco, BLEVE, escape tóxico
Dardo de fuego (jet fire)	Radiación, daño por el fuego	BLEVE, dardo de fuego, incendio de charco, escape tóxico
Bola de fuego (fireball)	Radiación, daño por el fuego	Incendio del recipiente
Llamarada (flash fire)	Radiación, daño por el fuego	Incendio del recipiente
Explosión mecánica ^(b)	Fragmentos, sobrepresión	Todos ^(c)
Explosión confinada ^(b)	Sobrepresión	Todos ^(c)
BLEVE ^(b)	Fragmentos, sobrepresión	Todos ^(c)
Explosión de nube de vapor	Sobrepresión, daño por el fuego	Todos ^(c)
Escape tóxico	-	-

^(a) El escenario secundario esperado también dependerá de las propiedades y cantidades de sustancias en el recipiente destino (recipiente que recibirá los efectos del o los vectores intensificación).

^(b) Los escenarios de accidente adicionales podrían tener lugar simultáneamente (incendio de charco, bola de fuego y escape tóxico).

^(c) Todos, cualquiera de los escenarios pueden ser desencadenados por los vectores de intensificación.

Efectos físicos de los vectores de intensificación

A continuación, se describen detalladamente todos los efectos físicos de los vectores de intensificación con el objetivo de facilitar la definición de los peligros y la cuantificación de las consecuencias que éstos pueden generar.

Incendio

Como muestra el análisis estadístico, **Anexo II**, aproximadamente el 50% de todos los accidentes con ED son causados por un incendio (evento primario), mientras que en (Hemmatian et al., 2015) se asegura que los recipientes y las tuberías son las unidades que con mayor frecuencia se involucran en un evento secundario.

Según (Reniers and Cozzani, 2013), las elevadas temperaturas del incendio, normalmente entre 800 y 1200 °C, por una parte aumentan la presión interna de los recipientes y por otra disminuyen su resistencia mecánica. La combustión de una mezcla aire-gas inflamable ocurre si su concentración está dentro de los límites de inflamabilidad y existen las condiciones de ignición.

Los factores desencadenantes de un incendio variarán en dependencia del tipo de sustancia, así como del límite de inflamabilidad y en dependencia de la presión, para presiones por debajo de la presión atmosférica implican un rango estrecho del límite de inflamabilidad, mientras que las sobrepresiones suponen un amplio rango, estos límites están afectados también por la temperatura, a temperaturas elevadas los rangos de inflamabilidad serán mucho más amplio, (Mannan, 2005).

(Reniers and Cozzani, 2013) plantean que las características de un incendio van a estar en dependencia de la sustancia que se quema, las condiciones de almacenamiento, la velocidad con que se fuga la sustancia y la velocidad y dirección del viento, mientras que el calor que genera puede transferirse por radiación, convección y conducción.

La mayor parte del calor generado por los incendios es transferido por convección y radiación. La convección representa aproximadamente el 75% del total del calor transferido. No obstante, la **radiación térmica** resulta el mecanismo de transferencia de calor de mayor significación en una instalación química a cielo abierto, debido a que el calor por radiación se transfiere directamente a los objetos cercanos, mientras que el calor por convección, en su mayor parte, se disipa hacia arriba, (Mannan, 2005).

La posibilidad de intensificación por radiación térmica resulta específica para cada escenario y tiene que ser evaluada con modelos que tomen en cuenta la intensidad de la radiación y las características de resistencia mecánica del equipamiento que puede ser afectado, (Reniers and Cozzani, 2013).

La **resistencia mecánica** de la pared de un recipiente, dependerá de la temperatura a que se someta y esta a su vez determina la capacidad de soportar un valor de presión determinado. La temperatura en la pared del recipiente, sometido a los efectos de la carga térmica externa, se incrementará en mayor o menor medida, en dependencia de la fase de la sustancia que almacena. Si el recipiente contiene un gas, la temperatura de su pared se incrementará rápidamente, disminuyendo su resistencia mecánica, debido a que el gas tiene un bajo efecto de enfriamiento. Si contiene una sustancia en fase líquida, el incremento de temperatura de la pared será lento, manteniéndose en un valor cercano a la temperatura del líquido que contiene, debido al alto efecto de enfriamiento del líquido.

El aumento de la temperatura de la pared del recipiente, y por consiguiente la disminución de su resistencia mecánica, puede conducir a su **rotura por explosión**, al incrementarse el valor de la tensión tangencial por encima de la tensión admisible del material, incluso esto puede ocurrir con la presencia de válvulas de seguridad o de alivio de presión, debido a que el incremento de la temperatura de la pared disminuye la tensión admisible del material del recipiente.

Dardo de fuego: se genera cuando una fuga de vapores o gases inflamables a presión tiene contacto con una fuente de ignición, puede ocurrir por la rotura de una tubería o depósitos de almacenamiento. En este tipo de incendio no hay retroalimentación de la llama y, por lo tanto, la cantidad de gas que sustenta la llama depende únicamente de las características del tipo de combustible y del caudal de salida (Perrero, 2006); (Gómez, et al., 2008). Según (Reniers and Cozzani, 2013), la duración de este vector puede variar desde unos segundos hasta horas en dependencia de la cantidad de combustible y de la fase en que se encuentre la sustancia inflamable. Un dardo de fuego de larga duración, de varios minutos a horas, puede modelarse como una fuente estacionaria de radiación. Las elevadas temperaturas y la alta carga de calor que involucra un incendio de este tipo implican una gran cantidad de radiación, por lo que este tipo de incendio se considera como de alto potencial de intensificación.

Tanto por sus características como por la alta frecuencia de ocurrencia reportada, el **dardo de fuego** es considerado una de las causas más probables de ED. Este vector puede provocar la intensificación del accidente primario por la acción directa de la llama sobre la unidad destino o por la radiación térmica a distancia. Los efectos de la acción directa de la llama del incendio de dardo están bien documentados, tanto por el estudio de los registros de accidente como por los experimentos realizados por (Shu et al., 2013), que evalúa las consecuencias de un dardo de fuego en las tuberías de transportación de gas natural.

Incendio de charco: generalmente ocurren debido a la ignición de un charco de líquido inflamable que se produce debido a la pérdida de contención de un recipiente. La combustión tiene lugar en los vapores generados del charco y su duración resulta generalmente mayor que la del dardo de fuego, debido a su larga duración puede este fenómeno modelarse como una fuente estacionaria de radiación térmica. Los modelos de ese tipo de incendio, así como sus características y la emisión térmica que genera están definidos en los trabajos de (Lees, 1996) y (Raj, 2007).

En los últimos años se han realizado una serie de trabajos relacionados con este tipo de incendio y han estado dirigidos tanto a las sustancias que se combustionan (Zhen and Xiaolin, 2014) y (Zhu et al., 2015); como a los métodos para valorarlos (Consalvi and Liu, 2014), (Sun et al. 2014), (Vasanth et al. 2014), (Vasanth et al. 2014a) y (Vasanth et al- 2015). Otras investigaciones están dirigidas a los incendios de charco involucrados directamente en un ED, como (Jujuly et al., 2015), también resulta importante el estudio de (Zhang et al., 2014) sobre la simulación de las consecuencias de un incendio de charco en un cubeto. En (Reniers and Cozzani, 2013) se asegura que los incendios de charco pueden provocar la intensificación del accidente primario, ya sea porque el equipo quede envuelto en las llamas o por la radiación a distancia.

Bola de fuego: es el fenómeno causado por la ignición inmediata de una nube de vapor generada por una severa pérdida de contención, su duración es menor que la del dardo y el incendio de charco, pero mayor que la de la llamarada, puede llegar al minuto y se le asocia una gran intensidad de radiación, (Reniers and Cozzani, 2013).

Además, en (Reniers & Cozzani, 2013) se considera que, aunque la duración de la bola de fuego es mayor que la de la llamarada, resulta relativamente corta comparada con el tiempo necesario para producir daños en los equipos vecinos, este hecho conlleva a que el efecto de la bola de fuego sea mayormente omitido en los análisis del ED cuando su incidencia es sobre recipientes a presión (paredes de mayor espesor). Sin embargo, se aclara, que este tipo de incendio podría causar daños en recipientes a presión atmosférica debido a su alta intensidad de radiación, y que en ese caso debería ser incluido en los análisis del ED como una posible causa de intensificación.

Por su parte (Heymes et al., 2014) analiza el triple efecto de una explosión, la proyección de fragmentos y la acción de una bola de fuego sobre los recipientes de almacenamiento de GLP y el posible desencadenamiento de un ED. Lo que indica que debe considerarse su efecto en fenómenos múltiples, por su contribución probable a la intensificación de los daños.

Llamarada: debido a la corta duración de este fenómeno no se considerará como un escenario creíble de accidente que conduzca a un ED, (*Kardell and Löf, 2014*).

Explosiones

Una explosión puede definirse como la generación de una onda de sobrepresión en el aire como consecuencia de la liberación de energía extremadamente rápida. Dentro de esta definición tan amplia tienen cabida diversos fenómenos físicos y químicos que, con cierta probabilidad, pueden presentarse en la industria de procesos o donde se utilicen sustancias peligrosas (*Díaz, 2006*). En el **Anexo III**, se resumen los principales métodos para el cálculo de los vectores de intensificación generados por las explosiones. (*Salzano and Cozzani, 2005*).

Según (*Barton, 1995*) y (*Mannan, 2005*), se deben considerar tres tipos principales de energía que pueden ser liberadas por una explosión: la energía física, la química y la nuclear. En la industria de procesos las explosiones químicas son las más frecuentes, en particular las que tienen lugar producto de la combustión de un gas inflamable, a priorizar en el *QRA*. Las explosiones pueden propagarse por detonación o por deflagración, siendo la detonación la más grave con velocidades de liberación de energía en el orden de miles de m/seg.

Otros autores, como (*Abbasi et al., 2010*), han realizado estudios muy novedosos sobre la clasificación de las explosiones, pero en este estudio se tomarán las definiciones de (*Mannan, 2005*), por ser más específicas para la industria de procesos, donde se clasifican en: explosiones físicas; explosiones de fases condensadas; explosiones de nubes de vapor (*VCE, por sus siglas en inglés*); *BLEVE (por sus siglas en inglés, expansión explosiva del vapor de un líquido en ebullición)*; explosiones confinadas con reacción y explosiones de polvo.

Sobrepresión: el daño sobre las unidades destino debido a las explosiones está relacionado con las cargas de sobrepresión desarrolladas por la onda de choque, la magnitud de estas cargas de sobrepresión variará en función de la cantidad de energía y la velocidad con que ésta es liberada, los efectos de la sobrepresión se calculan por diferentes métodos que van a estar en función del tipo de explosión, (*Kardell and Löf, 2014*).

Cuando se consideran explosiones que provienen de una fuente puntual, *por ejemplo el BLEVE* y la explosión de fase condensada, para la valoración de las consecuencias de los efectos de la sobrepresión se utiliza el **modelo TNT equivalente, Anexo III**, modelo conservador que convierte la energía liberada en equivalentes de TNT, (*Díaz, 2006*).

Sin embargo, al analizar fenómenos más complicados, *por ejemplo una explosión de nube de vapor* el modelo TNT equivalente no servirá, los modelos a utilizar para este fin deberán ser capaces de manejar impulsos y presiones máximas en el campo cercano y lejano. Para este tipo de cálculo se recomiendan los modelos **Multienenergía** y los métodos de **Baker–Strehlow**, (*Díaz, 2006*) de uso específico en el estallido de recipientes.

Según (*Tauseef et al., 2011*) y (*Reniers and Cozzani, 2013*), en los últimos años para el análisis de las explosiones en sistemas complejos se ha incrementado el uso de los modelos *CFD, por sus siglas en inglés (Computational Fluid Dynamics)*. Sin embargo, estos modelos computacionales presentan el inconveniente de ser muy consumidores de tiempo y recursos, por tanto, no son recomendables al analizar los ED en un *QRA*.

Proyección de fragmentos: es uno de los posibles efectos secundarios de las explosiones, y una de las causas más frecuentes de ED en la industria de procesos. La explosión de un recipiente es un típico accidente que conduce a la proyección de proyectiles. Los fragmentos pueden volar hasta un km de distancia, **Anexo III**, lo que conlleva a que sea considerada la posibilidad de niveles de intensificación secundarios y terciarios. Es la energía acumulada en el interior del recipiente, por lo general en forma de presión interna, la que puede hacer que se propaguen las grietas a través de la pared del recipiente, lo que conduce a la fragmentación, **Anexo III**, otra parte de esa energía interna se convierte en energía cinética de los fragmentos. Los fragmentos también pueden ser generados por las partes de equipos con movimientos rotatorios, *por ejemplo* turbinas y compresores, (*Reniers and Cozzani, 2013*).

Para el cálculo de la energía cinética de los fragmentos existen en la literatura varios métodos y modelos diferentes. Algunos de estos métodos consideran la eficiencia de la transformación de la energía interna en energía cinética, lo cual es afectado por dos parámetros principalmente: la condición del recipiente cuando explota y la condición del contenido en el recipiente, mientras que otros se basan en la simplificación de que casi toda la energía de la explosión es transferida a los fragmentos, (*Mannan, 2005*).

En cualquier caso de explosión, (*Reniers and Cozzani, 2013*), se puede desprestigiar tanto la velocidad como la dirección del viento, ya que la velocidad de los fragmentos es mucho mayor, solamente se considerarán las características del escenario y del diseño del recipiente.

Existen además métodos más complejos basados en el balance de la energía y el impulso donde el **modelo de Baker**, descrito en (*Baker et al., 1983*), es el de uso más frecuente.

Los modelos, por lo general, se restringen al tipo en particular de recipiente y la geometría de los fragmentos, por lo que resulta importante elegir un método que sea representativo para la situación en particular que se analiza, (*Kardell and Lööf, 2014*).

Los proyectiles, causados por la fragmentación, ya sea debido a la explosión de un equipo o por la proyección de partes de máquinas giratorias, son definidos como "proyectiles principales", debido a que son generados directamente del fallo de un equipo, mientras que se entiende por "proyectiles secundarios" los objetos que son arrastrados por la onda de choque en los alrededores del equipo que explotó. Al realizarse un estudio de ED la atención debe centrarse en los "proyectiles primarios", ya que estos son los que con mayor probabilidad pueden provocar la intensificación. La valoración de la proyección se puede dividir en tres pasos: el cálculo de la velocidad del fragmento: la estimación de las características de la fragmentación y el análisis del impacto, (*Reniers and Cozzani, 2013*).

Al tener en cuenta los proyectiles producto de partes de máquinas rotatorias, el cálculo de la velocidad de los fragmentos a menudo se simplifica, tomando la velocidad tangencial máxima de la pieza en rotación o calculándola por la ley de conservación de la energía cinética del rotor. Mientras que la definición del patrón de

fragmentación y las dimensiones probables de los fragmentos están basados, en la mayoría de los casos, en datos estadísticos de los recipientes y rotores similares a los que se están analizando, (Kardell and Lööf, 2014).

1.2.5. La cadena de accidentes y los diferentes tipos de efectos dominó

Como muestran las estadísticas la cadena de eventos dominó puede tomar diferentes formas, desde una cadena simple o de un solo nivel hasta cadenas multiniveles de accidentes (Reniers and Cozzani, 2013). En la *Figura 1.5* se representan tres de las posibles cadenas de ED.

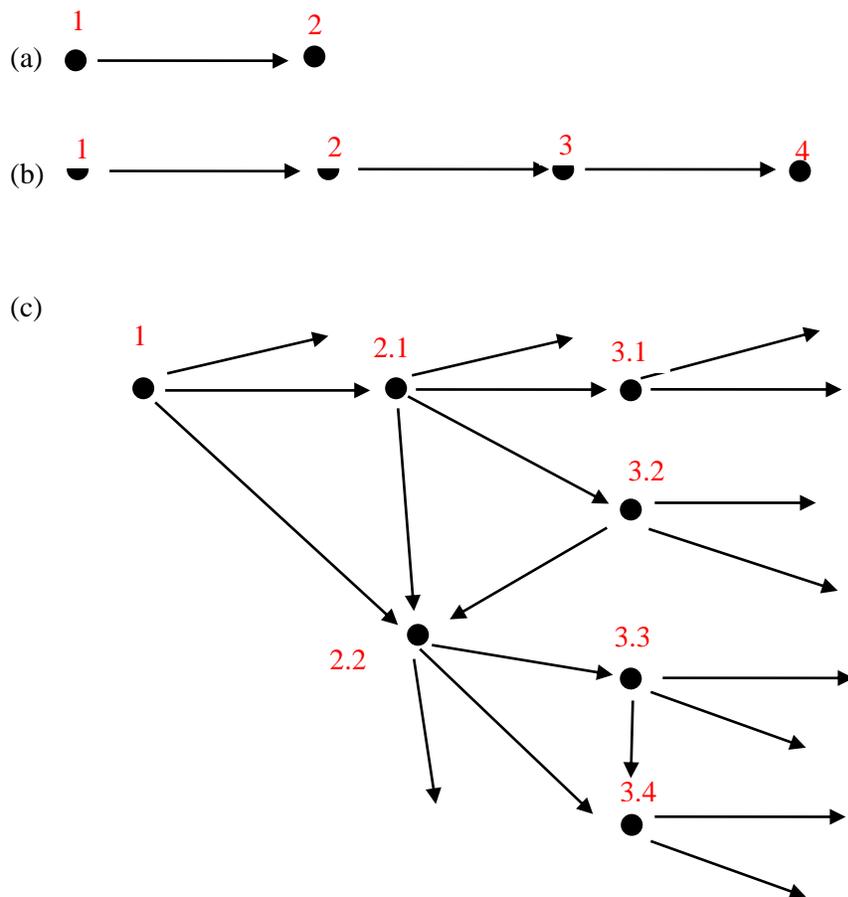


Figura 1.5. Ejemplos de cadenas de propagación del ED: (a) cadena simple de propagación; (b) cadena lineal dominó de múltiples niveles y (c) cadena multinivel de caminos de propagación paralelos, (Reniers and Cozzani, 2013)

En (Khan and Abbasi, 1998) se definen dos características fundamentales en el ED: La intensificación **directa** y **la indirecta**.

La intensificación *directa* es provocada por la exposición inmediata a los vectores de intensificación provenientes del evento primario, mientras que *la indirecta* se produce si uno de los vectores de intensificación provenientes del escenario primario dañan, *por ejemplo*, la sala de control de una instalación provocando una avería en algún sistema de control o que los operadores malinterpreten la información del sistema, conduciendo a que se produzca un accidente secundario, (Reniers and Cozzani, 2013).

Para obtener una identificación más detallada de los posibles escenarios ED, (Reniers, 2010) definió otras dos categorías: La intensificación de **eventos iniciadores de baja severidad** y la de diferentes **eventos críticos**.

El análisis histórico ha mostrado que estos **eventos iniciadores de baja severidad** pueden tener consecuencias devastadoras, en (Reniers and Cozzani, 2013) los autores describen un accidente en una planta italiana para la producción de etileno y propileno, la cadena de accidentes la inició la fuga por la junta de una de las bridas de una tubería de etileno, de pequeño diámetro (50 mm), lo que condujo a que se iniciara un pequeño dardo de fuego, este sometió a los efectos de la radiación térmica una tubería de 600 mm de diámetro, la que producto del calentamiento colapsó completamente provocando un gran dardo de fuego, a su vez este gran dardo de fuego afectó un tanque de almacenamiento de propano presurizado conduciendo a un *BLEVE*, la explosión afectó a tres tanques presurizados más, causándoles su ruptura todo ello implicó la casi total destrucción de la planta. Un análisis ordinario de riesgo, solamente se centraría en las consecuencias del evento primario, y al ser este un evento iniciador de baja severidad lo más probable es que no se tuviera en cuenta.

La **interacción de diferentes eventos críticos**, parte del hecho de que las consecuencias del evento primario son muy altas, según (Reniers and Cozzani, 2013), la propagación espacial es el factor principal cuando se valoran estos escenarios. Aquí resulta creíble asumir que la propagación del evento primario puede afectar tanto a las unidades cercanas dentro de las fronteras de la planta como a las construcciones que rodean sus fronteras.

1.2.6. Valores umbrales de intensificación

Los valores umbrales para los diferentes tipos de categorías de equipos, generalmente se toman de las bases de datos disponibles, con valores muy diferentes en dependencia de la fuente, lo que genera incertidumbre en los resultados a obtener, *por ejemplo*, las distancias de seguridad que se calculan, con uno u otro valor umbral, pueden variar desde decenas a centenas de metros.

Se puede encontrar una amplia información sobre valores umbrales y distancias de seguridad para el ED en la industria de procesos en: (Alileche et al., 2015), (Tong et al. 2013), (Antonioni et al., 2009), (Landucci et al., 2009 a), (Mingguang and Juncheng, 2008), (Cozzani et al., 2006), (Cozzani and Salzano, 2004 c); (Alileche et al., 2015) y DM 151/2001.

Estimación de la probabilidad de daño para cada unidad destino y cálculo de los valores Probit

Para estimar la probabilidad de daño sobre los equipos destino se pueden utilizar:

- ✓ Modelos definidos y disponibles en la literatura, *por ejemplo*, los modelos estáticos o métodos analíticos simples, tales como: el *SDOF* (*por sus siglas en inglés, The Single Degree Of Freedom*) o el *MDOF* (*por sus siglas en inglés, Multi Degree Of Freedom*) modelos utilizados por (Reniers and Cozzani, 2013).
- ✓ Códigos computacionales para estos análisis por elementos finitos (*FEA, siglas en inglés*), o la simulación utilizando los diseños computacionales de flujo (*CFD, por sus siglas en inglés*) los cuales permiten un análisis estructural más completo, (Masum et al., 2015).

- ✓ Cuando se toma el ED en consideración en un QRA hasta la aplicación de los métodos más sencillos para el análisis del impacto convierten el análisis en un alto consumidor de tiempo lo que va en contra de su uso en la práctica. Para minimizar el tiempo, resulta conveniente realizar las valoraciones tomando como base **los valores umbrales**. Aunque el uso de los valores umbrales de intensificación facilita el proceso de análisis, conduce a un cálculo determinista y no tiene en cuenta que los equipos destino están sometidos a diferentes intensidades de carga durante diferentes intervalos de tiempo, lo que influye en una mayor o menor probabilidad de fallo y de la intensificación de los vectores.
- ✓ Otra alternativa son los modelos de vulnerabilidad simplificados, correlacionados como las **funciones Probit**. Las ventajas del Probit, comparado con los enfoques basados en los valores umbrales, es que puede cuantificar la probabilidad de intensificación, teniendo en cuenta las características específicas de los equipos.

La función Probit es una ecuación analítica basada en la curva dosis–respuesta de forma sigmoidea, (CCPS, 1999). La función se representa por la variable Probit, **Y**, sobre la base de la dosis de exposición, **D**, según la siguiente expresión (Ec.1):

$$Y = a + b * \ln D \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde, **a** y **b** son los coeficientes utilizados para adecuar la función a los datos experimentales. Para transferir la variable **Y** obtenida a un valor de probabilidad se utilizan tablas de conversión o la ecuación (Ec.2):

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} * \int_{-\infty}^{Y-5} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde, **P** es la probabilidad; **u** es una variable de integración. **Y**, tiene una distribución normal, con un valor de media de cinco (5) y una desviación típica de uno (1). Cuando se analiza ED, las funciones Probit pueden ser utilizadas para valorar la vulnerabilidad de los equipos sometidos a los efectos de las cargas externas, sobrepresión y radiación térmica (CCPS, 1999).

(Eisenberg et al., 1975) definen una función Probit que correlacionaba el daño al equipo para la sobrepresión estática máxima. Muchas investigaciones posteriores han tratado de lograr las mejores correlaciones en las funciones Probit. En la literatura actual se encuentran valoraciones de la vulnerabilidad para varios equipos de proceso que se encuentren bajo los efectos de la sobrepresión y la radiación, *por ejemplo*, (Kadri Farid, 2013) presenta un método para la valoración del riesgo del ED causado por la radiación del calor y la sobrepresión sobre instalaciones industriales. Otros trabajos relacionados con este aspecto son: (Vilchez et al., 2001); (Cozzani and Salzano, 2004 c), (Landucci et al., 2009) y (Mingguang and Juncheng, 2008).

1.2.7. Daños esperados en equipos destino producto de las cargas de calor, tiempo hasta el fallo

Para cada escenario primario que pueda causar un incendio, el daño esperado debido a la radiación térmica sobre el equipo destino dependerá de otros factores, además de la intensidad del vector, tales como: la forma en que se provoca la afectación (*por una llama directa o indirecta*); el tiempo de exposición a la carga térmica y las características del equipo destino.

Para determinar si la unidad destino sufrirá daños o no, producto de las cargas de calor generadas en el accidente primario, podemos utilizar el denominado “enfoque directo” que consiste en comparar la magnitud de la carga de calor con los valores umbrales y su duración con el tiempo hasta el fallo, (*t_{tf}*, por sus siglas en inglés), del equipo destino.

El *t_{tf}* se puede definir como el tiempo necesario para que un equipo, sometido a los efectos de cualquiera vector de intensificación, colapse. Según (Cozzani et al., 2006), depende de: el diseño del equipo destino (*espesor de la envolvente, material de fabricación, si el recipiente trabaja a presión atmosférica o a presión, el volumen del recipiente, otros*); la presencia de sistemas de protección ya sean activos o pasivos (*el aislamiento térmico, las válvulas de seguridad, muros de contención*); la ubicación del equipo destino con respecto al accidente primario; si el equipo destino es envuelto parcialmente o totalmente por las llamas y si el equipo destino resulta afectado por una radiación directa o por el calor proveniente de una fuente lejana.

En (Cozzani et al., 2006) se define varios escenarios representativos, utilizando datos de los recipientes definidos por las normas y códigos, y se simuló el aumento de la temperatura de la pared del recipiente y la presión interna para diferentes cargas térmicas, lo que les permitió estimar el *t_{tf}* para cada escenario representativo. El análisis de sensibilidad validó el método utilizado “parámetros agrupados”. Esta investigación permitió correlacionar los modelos de vulnerabilidad representativos para la estimación de daños para diferentes categorías de equipos. Para profundizar en la información sobre los recipientes de referencia y escenarios, se recomienda acudir a (Cozzani et al. 2005) y (Cozzani et al., 2006).

El trabajo de (Landucci et al., 2009 a) revisó el estudio de (Cozzani et al., 2006) y validó el enfoque del modelo utilizado, al comparar los valores de *t_{tf}*, con los obtenidos con otro modelo desarrollado por el método de elementos finitos y con resultados de experimentos de la vida real, resultando un error relativo promedio del 15%. En esta misma publicación se muestra la dependencia entre el volumen del recipiente y el resto de los parámetros para mejorar la estimación de *t_{tf}*, lo que condujo a una actualización de los modelos de vulnerabilidad.

Los resultados de (Reniers and Cozzani, 2013) muestran que:

- ✓ En recipientes a presión atmosférica, expuestos a una radiación térmica proveniente de una fuente distante con intensidad inferior a 15 kW/m², el *t_{tf}* siempre será mayor a 10 min. y para radiación inferior a 10 kW/m² será mayor a 30 min.
- ✓ En recipientes a presión, el *t_{tf}* resultará superior a 10 min. para una intensidad de radiación proveniente de una fuente lejana de 60 kW/m², y superior a 30 min. para la intensidad de radiación inferior a 45 kW/m².
- ✓ El *t_{tf}* para el recipiente a presión dependerá de la presión de diseño.

En los análisis anteriores no se incluyeron los sistemas de protección, por lo que los resultados son conservadores, especialmente para los recipientes a presión, en los que casi siempre están presentes las protecciones térmicas como materiales a prueba de fuego y sistemas de mitigación activa como duchas de agua.

Según (Landucci et al. 2009 a), el t_{tf} resultó ser superior en 100 min., en un recipiente presurizado de 3m³, con capa protectora térmica, totalmente envuelto por llamas con una intensidad de 110 kW/m².

En (Reniers and Cozzani, 2013) a partir de resultados de diferentes experimentos realizados en recipientes a presión térmicamente protegidos, se muestra un t_{tf} mínimo de 94 min., muy superior a los recipientes a presión sin protección donde los valores van de 4 a 30 min. Se concluye, que el impacto de la radiación sobre los recipientes a presión con recubrimiento térmico se puede despreciar a la hora de analizar la posibilidad del ED.

Los recipientes abiertos a la atmósfera, resultan más vulnerables a la exposición a las cargas de calor que los recipientes presurizados por presentar menores espesores de pared. Los resultados del estudio de (Cozzani et al., 2006) muestran que los recipientes atmosféricos son propensos a estallar, al ser sometidos a niveles de radiación entre 60 a 90 kW/m², en un intervalo de tiempo entre 100-200 seg. Considerando que un incendio de charco, en función de la sustancia que contenga, tiene un poder emisor en la superficie de la llama que va de 120-170 kW/m², se concluye que la probabilidad de intensificación es de 100% para los tanques abiertos a la atmósfera.

Para el cálculo del t_{tf} se reportan las siguientes ecuaciones:

Recipientes atmosféricos

$$(25 - 17500 \text{ m}^3, 0.1 \text{ MPa}) \quad \ln(t_{tf}) = -1.13 \ln(I) - 2.67 * 10^{-5} * V + 9.9 \quad (\text{Ec. 3})$$

Recipientes a presión, (5 – 250 m³, 1.5 – 2.5 MPa)

$$\text{Fuente de radiación distante} \quad \ln(t_{tf}) = -0.95 \ln(I) + 8.845 * V^{0.032} \quad (\text{Ec. 4})$$

$$\text{Envuelto por las llamas} \quad \ln(t_{tf}) = -1.29 \ln(I) + 10.971 * V^{0.026} \quad (\text{Ec. 5})$$

1.2.8. Estimación del estado de daño e intensidad de pérdidas de cada unidad destino

Las diferentes intensidades de pérdidas de contención están estrechamente relacionadas con los diferentes estados de daño, el definir esta relación permite que sean valoradas cuantitativamente las consecuencias del escenario secundario, por lo tanto, la definición de las clases de intensidad de pérdidas (**LI**, por sus siglas en inglés) y su relación con las respectivas categorías de estado de daño (**DS**, por sus siglas en inglés) resultan un elemento importante en la estructura para la valoración del riesgo de ED, (Reniers and Cozzani, 2013). Esta valoración facilita la estimación del costo asociado a los daños sobre el equipamiento y puede utilizarse para valorar las pérdidas por paradas o tiempo perdido por los accidentes.

La literatura define las categorías de estado de daño en: **DS1**- daño ligero a las estructuras o al equipamiento auxiliar y **DS2**- daño intenso o catastrófico, el cual sin duda alguna, va seguido de una intensa pérdida de contención.

Las categorías de estado de daños están seguidas de diferentes clases de pérdidas de contención (intensidades de pérdidas). Existen muchos factores que afectan la severidad de una pérdida de contención, entre ellos los principales son: la intensidad del flujo de la fuga, las propiedades físicas y el estado del fluido contenido en el recipiente.

La literatura define tres clases de intensidad de pérdidas: **LI1**- pérdida menor, definida como la pérdida parcial del contenido del recipiente o la pérdida total del contenido en un intervalo de tiempo mayor de 10 min.; **LI2**- pérdida intensa, definida como la pérdida total del contenido dentro de los 10 min., y **LI3**- pérdida catastrófica, definida como la pérdida instantánea del contenido. La correlación entre las clases **LI** y las categorías **DS**, son comunes en varios artículos científicos y están basadas en el análisis histórico de accidentes.

1.2.9. Daños esperados en equipos destino producto de las cargas de sobrepresión

Los daños por este vector dependerán principalmente de la sobrepresión máxima estática y de las características del equipo, aunque existen otros factores que influyen, tales como: la sobrepresión dinámica, el tiempo de la fase positiva de la onda y del impulso total, así como las reflexiones de la onda de presión, la geometría y la posición relativa de los equipos bajo presión (*Baker et al., 1983*).

En (*Cozzani et al., 2006*), revisión de (*Cozzani and Salzano, 2004 a, b, c*), se analizaron una amplia gama de valores umbrales para la sobrepresión estática máxima, permitiendo correlacionar las funciones Probit y definir los valores umbrales de varias categorías de equipos.

Mingguang and Juncheng, 2008, revisaron el trabajo de (*Cozzani et al., 2006*), pero teniendo en cuenta toda la gama de probabilidad y con las mismas categorías de estado de daño y clases de intensidad de pérdidas, que se describen en el *epígrafe 1.6*, la gama de probabilidades (0-100%) se puede dividir en tres rangos de probabilidad: rango de 0-30% le corresponda el DS1LI1; de 30-70% le corresponda el DS2LI2 y de 70-100% le corresponda el DS2LI3. Además, utilizando un nuevo modelo ajustado, plantearon nuevas funciones Probit, que se derivaron del análisis de regresión por mínimos cuadrados, con las que se determinaron valores umbrales de intensificación más aceptables.

1.2.10. Daños esperados en equipos destino producto del impacto de la proyección de fragmentos

Para que se produzcan los daños y la intensificación del accidente primario debido a la proyección de fragmentos se requieren de dos condiciones: la distancia al equipo destino debe ser menor que la distancia máxima de proyección creíble y el impacto debe ser seguido de una pérdida de contención. El análisis histórico muestra que la proyección y el impacto de los fragmentos es una causa creíble de intensificación. El mecanismo de intensificación es complejo, e involucra tres fases principales: la formación del fragmento, la proyección del fragmento y el vuelo y daño por el impacto del fragmento, (*Reniers y Cozzani, 2013*).

Debido al alto grado de complejidad que acompaña a la proyección de fragmentos se hace casi imposible determinar con acierto tanto la frecuencia con que es probable que ocurra como el impacto del fenómeno, varios autores han realizado trabajos encaminados a determinar las distancias de seguridad y la frecuencia de ocurrencia, (*Cozzani et al., 2006*) analizaron el fenómeno y afirmaron que una probabilidad conservadora de impacto podría estimarse en $2.5 \cdot 10^{-1}$ a 100 m y de $2.5 \cdot 10^{-2}$ a 300 m, mientras que la estimación de la distancia de seguridad para la intensificación debido a la proyección de un fragmento proveniente de un *BLEVE* o una explosión mecánica puede ser superior a los 1000 m, esta distancia de seguridad sugerida resulta comparable con la distancia de 900 m obtenida por la revisión de los análisis históricos de accidentes, **Anexo II**.

Según (*Kardell and Lööf, 2014*), los fragmentos pueden causar diferentes tipos de daños a los equipos que impactan, *por ejemplo*; pueden perforar las paredes del equipo (*penetran todo el espesor de la pared del recipiente*); pueden quedar incrustados en la pared (*se detienen antes de atravesar completamente la pared del recipiente*) o los fragmentos pueden rebotar al impactar al equipo (*rechazan contra la pared del equipo*). Como resultado del gran espacio que recorren los proyectiles existen muchos factores que pueden afectar su comportamiento y el probable impacto sobre los equipos destino. Dentro de los parámetros que afectan la propagación del fragmento y por ende el daño al equipo impactado se pueden citar; la velocidad del proyectil, así como sus dimensiones, densidad, elasticidad y la solidez del proyectil y del equipo impactado.

La probabilidad de que ocurra una perforación es mayor para el caso de proyectiles con pequeños tamaños que para los de gran tamaño, los proyectiles pequeños se originan fundamentalmente como resultado del desprendimiento de piezas o partes de piezas de equipos en movimiento. Los proyectiles de gran tamaño por lo general viajan pequeñas distancias y provocan, principalmente, deformaciones plásticas en los equipos impactados.

La literatura brinda varios modelos de cálculo para los escenarios de penetración, la mayoría de ellos desarrollados a través de datos experimentales, (*Mannan, 2005*). Sin embargo, la deformación plástica es más difícil de modelar y aunque existen modelos que utilizan los métodos de análisis por elementos finitos para simular cargas de impulso sobre estructuras en la industria de procesos, aún no han encontrado una gran utilización, (*Zhang et al., 2015b*).

Existen en la literatura especializada diferentes modelos para el análisis de la posible trayectoria y la probabilidad de impacto de los fragmentos, tales como: (*Mébarki et al., 2009*) y (*Lisi et al., 2015*). Por otra parte, (*Díaz, 2006*), brinda una amplia información sobre las explosiones en general y sobre el impacto de los fragmentos en las personas, edificaciones y equipos, y propone una metodología para la determinación del alcance de los fragmentos.

1.2.11. Clasificación relativa del riesgo de efecto dominó

La cadena de eventos del ED, por definición, tiene que incrementar en conjunto las consecuencias, y los eventos secundarios, o de un nivel superior, con menor potencial de intensificación que el evento primario deberán ser excluidos del análisis, (*Kardell and Lööf, 2014*) recomiendan que se realice una **clasificación relativa** del riesgo dominó, es decir que todos los equipos destino que se encuentren dentro de la zona de afectación del accidente primario deberán ser clasificados en función de su potencial para intensificar las consecuencias.

La clasificación relativa del riesgo dominó consiste en investigar cuales de las unidades destino presenta la mayor cantidad de sustancias inflamables, el nivel de inflamabilidad y el punto de ignición y en qué forma están siendo procesadas estas sustancias (*gas o líquido, en condiciones de presión o abiertos a la atmósfera*). Además deben considerarse las distancias entre los equipos, los sistemas de seguridad (*activos o pasivos*) y los posibles escenarios que pudieran causar los vectores de intensificación y las posibilidades de intensificación a niveles superiores.

Para evitar terminar en una referencia circular, se deberá analizar toda cadena potencial de eventos que puedan seguir al accidente primario comenzando por la unidad que tenga el mayor potencial de intensificación y posteriormente se analizarán el resto de las unidades hasta la que presente el menor riesgo dominó.

El riesgo de que dos o más unidades sufran daños simultáneamente es preferible incluirlo en la clasificación de riesgo dominó como escenarios diferentes. Sin embargo, la consecuencia general de varias unidades que sufren el daño de manera simultánea tiene que ser mayor que la consecuencia individual de la unidad de mayor potencial de escalado de las involucradas en el daño.

1.2.12. Cálculo de la frecuencia y consecuencia total del ED

En la determinación de la frecuencia del ED se pueden aplicar diferentes métodos que van desde los tradicionales árboles de eventos y fallas hasta los más recientes como la Simulación Monte Carlo o la utilización de las Redes Bayesianas Dinámicas (RBD). Independientemente de la técnica de análisis que se haya adoptado, en el proceso de incluir el ED dentro del QRA, el análisis del fenómeno parte del cálculo de los vectores de intensificación generados por el accidente primario y la estimación de la probabilidad de daños para cada unidad destino, repitiéndose este proceso para los niveles superiores de intensificación.

Según (Reniers and Cozzani, 2013), la evaluación de la frecuencia de los sucesos de intensificación (*fde*) se puede calcular a partir de la frecuencia de falla esperada de un equipo (*fpe*) y la probabilidad de intensificación (*Pa*), utilizando la ecuación (Ec. 3):

$$f_{de} = f_{pe} * P_d \quad (\text{Ec. 6})$$

$$P_d = P\left(\frac{E}{PE}\right) \quad (\text{Ec. 7})$$

donde: Las frecuencias *fde* y *fpe* se expresan en eventos/año y (*E*) dado que ocurra el evento primario (*PE*).

La probabilidad de intensificación se puede evaluar utilizando los modelos probabilísticos de daños para los equipos (*funciones Probit correspondientes a los daños en el equipo*). Para la validez de (Ec. 6) y (Ec. 7), el evento primario y el secundario se suponen mutuamente excluyentes desde el punto de vista probabilístico, lo que significa que sólo se producen al mismo tiempo si tiene lugar una intensificación (Reniers and Cozzani, 2013).

Para una instalación química compleja es usual que un accidente primario sea capaz de provocar simultáneamente más de un evento secundario, para esta situación la (Ec. 6) continúa siendo válida, proporcionándonos la probabilidad total de que un evento secundario dado que fue iniciado por el evento primario, pero la frecuencia del escenario ED se calculará considerando la posibilidad de que haya más de un escenario secundario provocado por el mismo escenario primario (Reniers and Cozzani, 2013). Por consiguiente el término *Pa*, englobará una combinación de varios términos en función de la cantidad de eventos probables, *por ejemplo*, la relación de probabilidad para una combinación de tres eventos (A, B y C) se expresa como:

$$P(A B C) = P(A) + P(B) + P(C) - P(A B) - P(A C) - P(B C) + P(A B C) \quad (\text{Ec. 8})$$

Al aplicar este enfoque en plantas complejas, con gran cantidad de equipos interactuando, el número de ecuaciones a utilizar sería muy grande lo que requeriría de potentes recursos computacionales para la realización de los cálculos.

Se puede concluir, según (*Abdolhamidzadeh et al., 2010*), que los métodos analíticos solucionan sólo los problemas de menor complejidad (un nivel y un vector de intensificación). Además presentan lagunas en el entendimiento del sistema o se hacen muy complejos desde el punto de vista matemático y se limitan a valores esperados, por esto, el modelo utilizado en las técnicas analíticas es usualmente una simplificación de los sistemas complejos. Estas limitaciones han estimulado el desarrollo de nuevos métodos para la evaluación de la frecuencia del ED.

Para el análisis de las consecuencias se utilizan las mismas herramientas desarrolladas en el *epígrafe 1.1.4*. (*Carol et al., 2002*)

Evaluación de la frecuencia basada en el análisis de árboles de fallos o eventos

En el *QRA* convencional, la frecuencia se calcula generalmente a través de árbol de fallas, árbol de eventos o una combinación de los dos enfoques, llamado análisis de *bow-tie*, (*Vilchez et al., 2011*). Métodos también aplicables al análisis de la frecuencia de ED, en el **Anexo II** se presentan varios árboles de eventos, seleccionados de la bibliografía para evaluar el ED en diferentes circunstancias.

En un sistema complejo, donde un simple evento inicial puede dar lugar a varios eventos secundarios y cada evento secundario puede conducir a eventos de un nivel superior, además es probable que haya más de un evento primario, la carga de trabajo al incluir las probabilidades para la intensificación es muy grande. Cada escenario primario requerirá de grandes árboles de eventos y el análisis de la frecuencia de ED puede hacerse muy difícil, incluso con el gran desarrollo computacional alcanzado en los últimos años, (*Reniers y Cozzani, 2013*).

No obstante, el método recomendado para el análisis de la frecuencia de la cadena de eventos para cada escenario representativo, es el del *árbol de eventos* ya que permite la identificación de todos los resultados finales y con ello valorar el impacto de todos los eventos con posibilidades de desencadenar una intensificación a las unidades cercanas lo que lleva a una evaluación más realista de los escenarios accidentales.

Un enfoque alternativo para simplificar el *análisis del árbol de eventos*, sería identificar las unidades críticas que, si se involucran en un accidente conducirían a las consecuencias más graves. Mediante la realización del análisis por el *árbol de fallas*, donde cada unidad crítica será vista como un evento tope, la frecuencia de estos accidentes de gran severidad puede ser actualizada en relación con el riesgo de ED.

El riesgo de intensificación a otras partes de una misma instalación o a plantas vecinas puede ser estimado también mediante el análisis del *árbol de eventos*. El riesgo general asociado a cada cadena de acontecimientos de ese modo se puede estimar mediante el análisis *bow-tie*. En los trabajos de (*El Hajj et al., 2015*); (*Yaneira et al., 2014*) y (*Pitblado and Weijand, 2014*) se podrán encontrar *ejemplos* de aplicación de este tipo de diagrama.

Evaluación de la frecuencia mediante la Simulación Monte Carlo

La Simulación Monte Carlo (SMC) permite una evaluación iterativa de un sistema usando como entrada un juego de números aleatorios. El método es mayormente utilizado en sistemas altamente complejos de comportamiento no lineal y que involucran más de un parámetro incierto. La SMC trabaja particularmente bien para un proceso donde las probabilidades subyacentes sean conocidas pero difícil de determinar su interacción, (*Abdolhamidzadeh et al., 2010*), consideran que por la naturaleza del fenómeno, el ED se adecua correctamente a esta técnica de simulación.

Antes de hacer SMC, deben ser establecidas las probabilidades de accidentes primarios y las probabilidades de intensificación (*Abdolhamidzadeh et al., 2010*).

La probabilidad del accidente primario se puede obtener, de forma alternativa a partir de datos genéricos o mediante la realización de un análisis de árbol de eventos o árbol de fallos, la probabilidad de intensificación a menudo se obtiene mediante modelos Probit. Estas probabilidades se configuran como entradas al modelo y dependiendo de la complejidad del sistema a examinar, o sea en función del número de incertidumbres que se le asocien al sistema, se establece el número de corridas que puede estar normalmente en el orden de miles, (*Rezaei et al., 2007*). Para cada variable se asigna una distribución y cada corrida da como resultado un valor estocástico para cada variable, el cual se asigna dentro de los límites de la distribución, la SMC presenta una debilidad, que para el análisis del ED resulta un factor importante a tener en cuenta, y es el hecho de que no tiene en cuenta las dependencias entre las incertidumbres.

En la investigación de (*Abdolhamidzadeh et al., 2010*) se propone un algoritmo para sistemas de múltiples unidades bajo la influencia del ED, denominado *FREEDOM*. Esta metodología está basada en la SMC y supera las principales limitaciones de los métodos analíticos:

- ✓ La incapacidad de manejar las incertidumbres, mientras que los métodos analíticos están limitados solamente a valores esperados, la SMC proporciona un amplio rango de parámetros de salida incluyendo diferentes funciones de probabilidad.
- ✓ La incapacidad de manejar la complejidad asociada con el ED, mientras que el modelo utilizado en las técnicas analíticas es usualmente una simplificación de los sistemas complejos, la SMC es independiente de la complejidad del sistema real.

Recientemente, (*Sun et al., 2015*) utilizaron la SMC para el estudio de la distribución de los fragmentos, la probabilidad de impacto y de daños de estos sobre los equipos destino y el riesgo del ED provocado por los fragmentos para diferentes tipos y tamaños de fuentes.

Por otra parte, (*Lisi, et al., 2015*), con el propósito de incorporar los estudios realizados sobre la trayectoria real de los fragmentos a un *QRA* estándar, desarrolló, aplicando la SMC a las ecuaciones de trayectorias de los fragmentos, un modelo probabilístico para la estimación de la probabilidad de impacto de los fragmentos.

Evaluación de la frecuencia mediante el uso de Redes Bayesianas

Las Redes Bayesianas (RB) se han convertido en una de las herramientas más potentes y de mayor actualidad para el análisis de riesgo en general y, en particular, para el ED. Destacadas por (*Abdolhamidzadeh et al., 2011*); (*Weber et al., 2012*); (*Jinhua et al., 2013*); (*Barclay et al., 2013*) y (*Khakzad, 2015*).

Las RB encuentran un amplio uso en la determinación de la frecuencia de los escenarios dominó, ya que entre otras ventajas, permite el razonamiento bajo incertidumbre y el modelado de un sistema de dependencias, (*Bobbio et al., 2001*).

Según (*Khakzad et al., 2013*) las RB presentan una estructura flexible y una técnica de modelación única lo cual garantiza que el ED sea analizado a través de un marco probabilístico, teniendo en cuenta la sinergia, las probabilidades de ruidos y las fallas con causas comunes, además esta nueva herramienta permite tener en cuenta aspectos tan importantes como las incertidumbres y las complejas interacciones entre los componentes del ED, estos autores desarrollaron una metodología basada en las RB que permite estimar tanto el patrón de propagación como la probabilidad de propagación a diferentes niveles del ED.

En (*Reniers and Cozzani, 2013*) se ratifica que una de las ventajas del enfoque de RB es su flexibilidad y la facilidad de actualizar los datos iniciales si se obtiene una nueva información, esto se logra usando el teorema de Bayes.

Mediante el mapeado de árboles de fallos en una RB, las dependencias entre las diferentes unidades y las incertidumbres en el sistema se pueden capturar mejor que en un análisis de árbol de fallos convencional. Esto se debe principalmente al hecho de que las RB se basan en dependencias probabilísticas mientras que el análisis de árbol de fallos sólo puede manejar dependencias deterministas (*Bobbio et al., 2001*).

En la RB, la planta se modela como un sistema de variables; por lo general cada unidad o equipo se considera una variable definida como un nodo. Los nodos están conectados por arcos directos que representan sus dependencias, los nodos desde donde parte el arco se denominan nodos padres y los nodos a donde llegan los arcos son nodos hijos, un nodo puede ser simultáneamente padre e hijo (el hijo de un nodo y el padre de otro). Los nodos sin padres son conocidos como nodos raíz y los nodos sin hijos como nodos hojas (*Kardell and Löff, 2014*).

La RB calcula la distribución de probabilidad para el sistema multiplicando las probabilidades de los padres conectados para cada nodo (*Reniers y Cozzani, 2013*). Representación esquemática de RB, *Figura 1.6*.

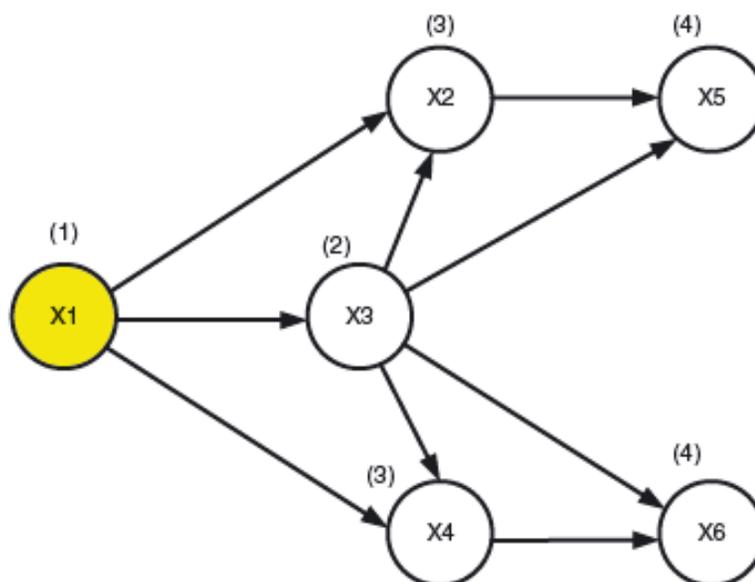


Figura 1.6. Representación de una RB del probable modelo de propagación de un ED (Khakzad et al., 2013)

1.2.13. Representación del perfil de riesgo incluyendo el ED

La inclusión del ED en el perfil de riesgo del *QRA* convencional, representará las líneas iso-riesgo para cada caso, mostrando gráficamente la intensificación de las zonas de consecuencias, en la *Figura 1.7*, se muestra un ejemplo.

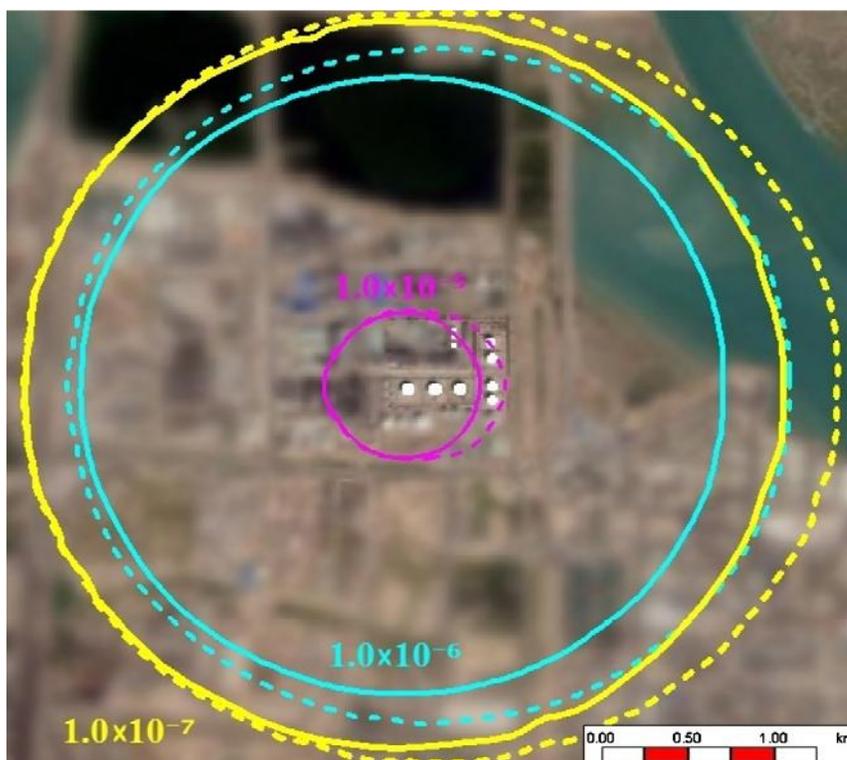


Figura 1.7. Ejemplo de un perfil de riesgo individual presentado por líneas de iso-riesgo, sin tener en cuenta el efecto dominó, líneas continuas y teniendo en cuenta el efecto dominó, líneas de punto, (Abdolhamidzadeh et al., 2010)

1.3. Modelos existentes para la integración del efecto dominó en el QRA

En (*Reniers and Cozzani, 2013*) se asegura que desde comienzos de los noventa se han realizado grandes esfuerzos para desarrollar métodos cualitativos para la valoración del ED. Recientemente las investigaciones han estado dirigidas a desarrollar herramientas que permitan el QRA del ED, tales como, (*Landucci et al., 2009*); (*Jinhua et al. 2013*); (*Kadri and Chatelet. 2013*); (*Baesi et al., 2013*); (*Acikalin, 2009*); (*Cozzani et al., 2009*) (*Ahmadpour et al., 2014*) y (*Kardell and Lööf, 2014*).

Normativas como (*Directiva Europea Seveso II, 1996*) y (*Seveso III, 2012*), obligan a las instalaciones químicas, entre otras, a la identificación y valoración de los peligros ED, fenómeno importante a tener en consideración en el campo de la prevención de pérdidas mayores.

Aunque las técnicas de QRA han sido ampliamente usadas para la valoración del riesgo, su aplicación para los ED ha sido limitada, (*Kardell and Lööf, 2014*). El análisis cuantitativo del ED requiere grandes recursos computacionales, no disponibles hasta años recientes, (*Reniers and Cozzani. 2013*). Estos mismos autores recomiendan prestar una mayor atención al desarrollo de métodos que permitan que el ED esté integrado en la estructura de un QRA.

Uno de los primeros en incluir el ED en un QRA convencional fue (*Cozzani et al., 2005*), desarrollando un procedimiento sistémico para la valoración cuantitativa del ED, definiendo los efectos físicos del accidente primario (vectores de intensificación), y los principales escenarios ED a tener en cuenta. Sus principales logros estuvieron en la determinación de la gravedad esperada del ED y en la implementación de una técnica simplificada para la valoración de la vulnerabilidad de los escenarios dominó. Otro logro fue el análisis de las consecuencias y la implementación de la metodología a diferentes casos de estudio utilizando un *software*. Se le puede señalar que en la metodología desarrollada no se contemplan los pasos correspondientes al QRA convencional limitándose a mostrar sólo lo relacionado con el ED.

En este mismo trabajo (*Cozzani et al., 2005*) desarrolló una metodología de QRA teniendo en cuenta el ED provocado por la explosión de una nube de vapor, el estudio aunque profundo no muestra una secuencia de la metodología propuesta y se limita al caso de los ED provocados por la explosión de una nube de vapor.

Por su parte, (*Antonioni et al., 2009*) aplicó su metodología a un área industrial logrando identificar los escenarios finales ED, así como la valoración de las probabilidades de intensificación como un factor importante a la hora de identificar los equipos críticos y abordar la prevención y las posibles acciones de protección. Los autores presentan su metodología, donde describen los pasos a seguir pero al no mostrar el diagrama de flujo no queda claro la obligatoria interacción que debe existir entre los pasos de la metodología para su mejor aplicación.

El trabajo de (*Bernechea et al., 2013*) propone un método simple para incluir el ED en un QRA, exponen un algoritmo para el desarrollo de las secuencias ED y el cálculo de las frecuencias finales, su principal limitación radica en que está dirigido únicamente a las instalaciones de almacenamiento.

La investigación de (*Nomen et al., 2014*) se centró en la vinculación del ED al *QRA* con vistas a lograr una mejor distribución en planta del equipamiento en la etapa de diseño, utiliza el criterio del área encerrada en las curvas de iso-riesgo para comparar los resultados obtenidos en el *QRA* vinculado al ED, su principal logro está en el uso del *QRA* vinculado al ED en la etapa de diseño de instalaciones industriales con el fin de lograr diseños más seguros y económicos en cuanto al uso del espacio, se le puede señalar que, además de no presentar diagramas ni algoritmos donde se desarrolle y visualice paso a paso la metodología, el trabajo está enfocado solamente a las áreas de almacenamiento.

Dentro de los últimos trabajos referenciados sobre inclusión del ED en el marco de un *QRA*, se encuentran (*Kardell and Lööf, 2014*) y (*Cozzani et al., 2014*), el primero presenta una metodología bien estructurada donde se comienza por los pasos convencionales del *QRA* y se inserta el análisis del ED, el método tiene en cuenta además, todos los posibles lazos que se requieren para lograr la necesaria interacción que debe existir entre los pasos de la metodología, otras de sus ventajas radica en que puede ser aplicada a cualquier escenario, se le puede señalar, y es reconocido por los propios autores, que no tiene en cuenta efecto económico o ambiental alguno, y que no trata los peligros naturales.

La metodología de (*Cozzani et al., 2014*) se puede considerar como la más completa hasta ahora publicada, en ella se vincula la valoración del riesgo ED y los peligros naturales con el *QRA*, mejoran los últimos modelos para la valoración de la probabilidad de daño sobre los equipos, tanto para los escenarios ED como para los peligros naturales, presenta además un nuevo enfoque para la valoración cuantitativa multinivel de los escenarios ED, aunque no hace referencia, al igual que el anterior, al efecto económico.

Conclusiones parciales

1. La investigación bibliográfica, permitió constatar la gran importancia que están adquiriendo los métodos para la evaluación del efecto dominó en la actualidad. Esto se debe básicamente a dos razones; a las nuevas legislaciones que exigen su aplicación y a que estos métodos son una herramienta importante de prevención del riesgo de accidentes mayores, que pueden aparecer en las diferentes etapas del ciclo de vida de las instalaciones industriales que manejan sustancias peligrosas, con los consiguientes beneficios sociales, económicos y medioambientales.
2. Los modelos de análisis, descritos en la literatura estudiada, se diferencian por la forma de representar la cadena de eventos (ED). En estos modelos se analizan por separado los escenarios ED, a partir de un *QRA* convencional, con resultados poco confiables, por la posible subvaloración de gravedad de los eventos que se evalúan.
3. Las técnicas para el análisis cuantitativo de riesgo (*QRA*) han sido ampliamente utilizadas para la valoración de accidentes convencionales, pero su aplicación para efecto dominó (ED) *ha sido muy limitada*, por lo que se hace necesario el desarrollo de métodos y procedimientos que permitan que el ED esté integrado en la estructura del *QRA*.



Capítulo II

CAPÍTULO II. Metodología para el análisis cuantitativo de riesgo de accidentes mayores probables en la industria química, considerando la intensificación de los daños por efecto dominó

En el Capítulo I, de revisión y análisis bibliográfico, quedó definido que aunque las técnicas para el análisis cuantitativo de riesgo (*QRA*) han sido ampliamente utilizadas para la valoración de accidentes convencionales, su aplicación para efecto dominó (ED) *ha sido muy limitada*, por lo que se le debe prestar una mayor atención al desarrollo de métodos y procedimientos que permitan que el ED esté integrado en la estructura del *QRA*.

Las *diferencias típicas* entre los modelos de análisis, que se describen en la literatura, se encuentran en la forma en que representan la cadena de eventos (ED). *Lo común* en estos modelos es el análisis por separado de los escenarios ED, comenzando por los resultados obtenidos en un *QRA* convencional, lo que conlleva a resultados poco confiables, por la posible subvaloración de gravedad de los eventos que se evalúan.

En este Capítulo, se toma como base las fortalezas de los métodos de análisis, publicados en las numerosas referencias estudiadas, y se propone una nueva metodología que integra en el *QRA* convencional, la evaluación de la influencia del ED en el aumento de la frecuencia e intensificación de las consecuencias de los accidentes mayores probables en la industria química.

Esta propuesta metodológica se caracteriza por un conjunto de premisas generales, dadas por valoraciones, consideraciones y recomendaciones, asumidas por el autor, con el objetivo de facilitar su aplicación práctica. A continuación se describen dichas premisas.

Premisas generales de la metodología propuesta

- ✓ Esta metodología es flexible, permite ser utilizada para alcanzar diferentes objetivos en los estudios de casos, así como adoptar varios métodos y herramientas para el análisis de frecuencias y consecuencias.
- ✓ El *QRA* convencional, que se toma como base, utiliza las mejores herramientas existentes, a lo que se le adicionan modelos que hayan probado la manera de simular el comportamiento del ED, implementando pasos o procedimientos adicionales en la metodología para su inclusión.
- ✓ La metodología consiste en ejecutar los cuatro pasos clásicos del *QRA*: la identificación de los peligros, la valoración de frecuencia, el análisis de consecuencias y la representación del perfil de riesgo, y luego se evalúan los pasos integrados.
- ✓ La efectividad del método dependerá de la integración lógica que se logre en los pasos adicionales referidos al análisis del ED, de manera que se pueda lograr el flujo natural del proceso.
- ✓ La inclusión del ED en el marco de un *QRA* convencional implica que se tiene en cuenta dentro de un subsistema, entre los subsistemas diferentes y de una planta química a otra, incluyendo el entorno.
- ✓ El ED es un fenómeno muy complejo, por lo que resulta crucial definir claramente tanto el alcance como el contexto, así como definir el nivel de detalle y las delimitaciones en las que se basará el análisis.

-
- ✓ Cada paso integrado al *QRA* convencional debe ser considerado como un marco base, donde se compilan los diferentes enfoques existentes de análisis del ED, con la posibilidad de adicionar y/o modificar los procedimientos donde se necesite.
 - ✓ La adición de nuevos procedimientos se fundamenta en la posibilidad de ser manejables para un tiempo de estudio de riesgo limitado y para que el ED pueda ser tomado en consideración en el *QRA* sin que se tenga que hacer un análisis diferente o independiente.
 - ✓ En la aplicación de la metodología se debe asumir (*según el caso de estudio*) la definición de las tres principales categorías de herramientas para el análisis cuantitativo de los eventos con ED:
 - Valores umbrales para la identificación de las unidades destino potenciales,
 - Modelos de daños de los equipos expuestos y
 - Herramientas específicas y procedimientos para la valoración de frecuencias y consecuencias de todos los escenarios con ED.
 - ✓ Para estimar la frecuencia se recomienda llevar a cabo el *análisis del árbol de eventos* para cada escenario representativo, lo que permite que sean identificados tanto la cadena de eventos (ED) como los resultados finales, de esta manera los impactos de todos los eventos que puedan provocar la intensificación del accidente a las unidades cercanas pueden ser tenidos en cuenta, lo que conduce a una valoración más real de los escenarios de accidentes.
 - ✓ Para comparar que el perfil de riesgo sea comparado con un *criterio de riesgo tolerable* se deben tomar los contornos del riesgo con respecto a los daños materiales como la manera más sencilla de presentar dicho perfil. Aunque no limita la posibilidad de utilizar otros criterios de comparación, *por ejemplo*, los referidos a daños a personas y al medio natural.
 - ✓ Para mantener el análisis del ED en proporciones (valores) razonables se propone incluir en el análisis un *criterio de corte* que delimita los escenarios. La literatura utiliza frecuentemente un criterio de corte de frecuencias por encima de 10^{-8} años⁻¹, este valor puede tomarse como referencia, y cambiarse a conveniencia del análisis.

Además de las premisas generales relacionadas, en cada paso de la metodología se harán recomendaciones específicas, que complementarán las anteriores.

En la *Figura 2.1* se representa la nueva metodología desarrollada en forma de diagrama de flujo detallado y a continuación se describe cada paso, método o procedimiento que la componen.

Los cuadros de texto *no resaltados* representan el núcleo principal de un *QRA* convencional, mientras que los *cuadros sombreados* son los procedimientos añadidos para el análisis sistémico del ED.

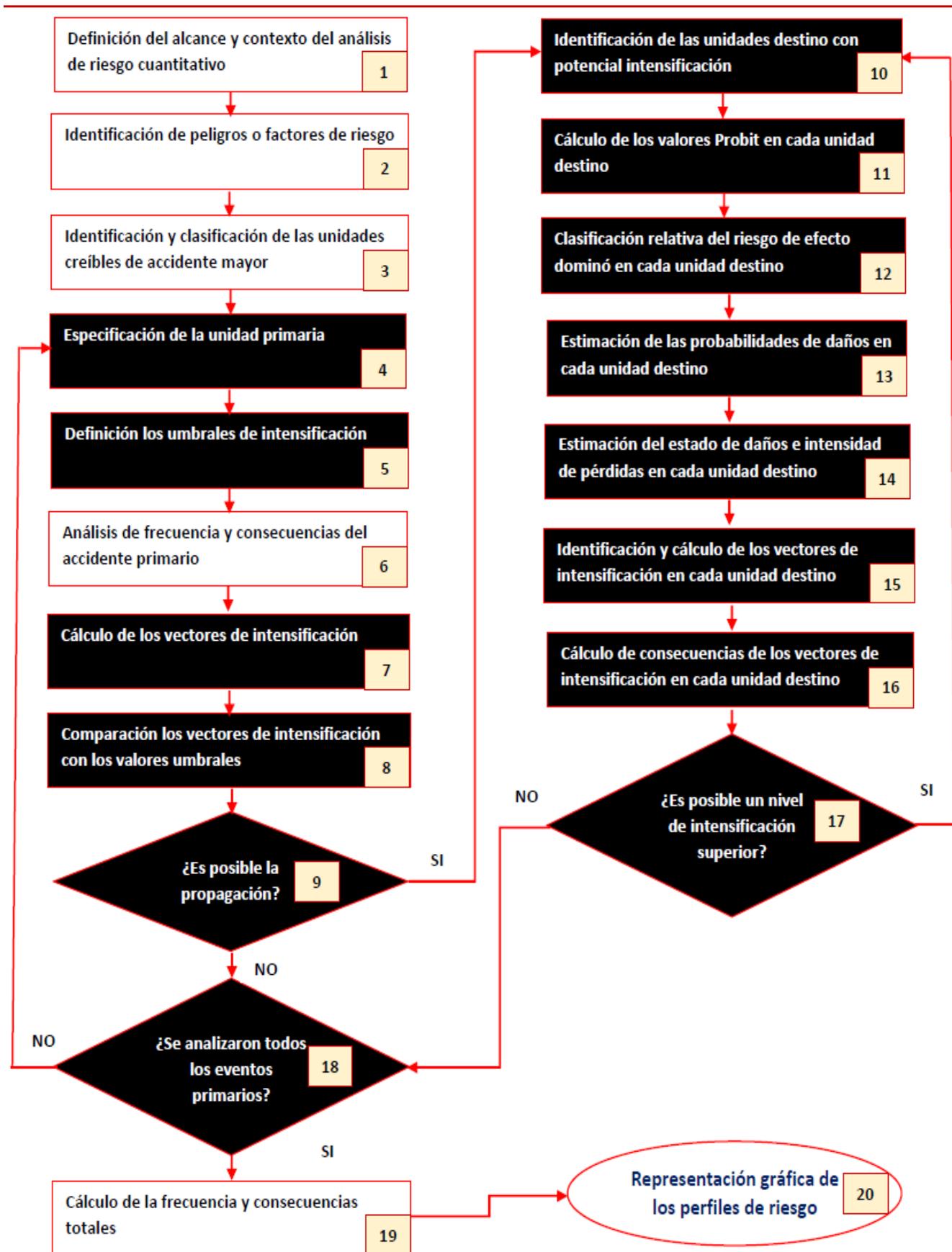


Figura 2.1. Diagrama de flujo de la nueva metodología de QRA incluyendo el ED

2.1. Definición del alcance y contexto del análisis de riesgo cuantitativo (Cuadro No.1)

En este paso las partes involucradas (*grupo de investigadores y la representación técnica de la industria*), de mutuo acuerdo, definirán tanto el área de interés como el nivel de detalle que tendrá el estudio, para lo cual se recomienda considerar básicamente los elementos siguientes:

- ✓ Descripción general de la instalación y de los procesos,
- ✓ Plano de la instalación con la ubicación de los equipos, sistemas de protección tanto pasivos como activos, así como las distancias entre equipos y las fronteras del área seleccionada,
- ✓ Diagrama de flujo de la instalación con una descripción detallada del equipamiento, y
- ✓ Caracterización de las sustancias peligrosas involucradas en el proceso, ya sean materias primas o productos terminados, que cantidad y como son procesadas.
- ✓ Definición de las áreas de riesgo de la instalación objeto de estudio, lo que dependerá de la complejidad de los procesos y del alcance que se pretenda en el análisis.
- ✓ Asimismo es importante, definir las simplificaciones y factores de riesgo a descartar en el estudio, y la necesidad o no de valorarlos, como nuevos escenarios, en análisis independientes, con el objetivo de que quede definida su significación, y con ello minimizar la confusión en la interpretación de los resultados por evaluadores externos.

2.2. Identificación de peligros o factores de riesgo (Cuadro No.2)

Este es el paso de mayor significación en un *QRA* debido a que es, en la identificación de los peligros, donde se definen las bases de la evaluación posterior. Si sólo uno de los factores de riesgo importantes no es evaluado, el objetivo del análisis de riesgo cuantitativo no será cumplido.

La limitación de tiempo para realizar el *QRA* no permite que todas las fuentes de riesgo sean evaluadas adecuadamente, por lo que resulta muy importante identificar los escenarios de riesgo más representativos, aquellos que puedan abarcar el mayor rango de las posibles amenazas, esta idea puede llevarse a cabo realizando una valoración preliminar del riesgo donde las fuentes de riesgo de baja frecuencia de ocurrencia y severidad sean descartadas, para lo cual se requiere de conocimientos y herramientas adecuadas para lograr un análisis con el nivel de exactitud requerido, lo que se dificulta en la medida que aumente la complejidad de los sistemas en estudio.

Varias herramientas para la identificación de riesgos están disponibles en numerosas fuentes bibliográficas, entre ellas las más conocidas son: Lista de Chequeo; Índices de Seguridad (*Dow F/El & Mond*); Análisis Preliminar de Peligros (*PrHA*); ¿Qué pasa si?; Análisis de Operabilidad y Peligros (*HAZOP*); Estudio de Identificación de Peligros (*HAZID*); Modos de Fallo, Efectos y Análisis de Criticidad (*FMEA*).

La selección de la técnica adecuada estará fuertemente ligada a la complejidad del objeto analizado. *Por ejemplo*, para las plantas complejas donde el procesamiento de material peligroso resulta significativo, el consenso general

es utilizar una técnica de análisis profunda, tal como el *HAZOP*. A menudo, para garantizar un nivel satisfactorio de identificación de peligros lo recomendado es el uso de una combinación de varias técnicas.

Las técnicas seleccionadas deben ser eficaces en la identificación de los peligros de accidente mayor asociados a las sustancias involucradas en los procesos de una instalación en la medida de su complejidad. Entre los factores de riesgo a identificar se destacan:

- ✓ Posibles peligros asociados a las sustancias industriales que son guardadas o procesadas en cantidades que superan los umbrales definidos para el nivel de riesgo por unidad de masa de la sustancia.
- ✓ Peligros asociados a las características de las sustancias presentes en el proceso: Materias primas, productos intermedios, productos finales, subproductos, aditivos, catalizadores, corrientes de desecho.
- ✓ Posibles peligros debidos a materiales, equipos y sus condiciones de operación, como *por ejemplo*: Altas presiones, altas temperaturas, asfixia por N₂, salpicaduras de aceite caliente o contactos con vapor, superficies calientes, materiales criogénicos, alta energía cinética, alto voltaje / corriente / electricidad estática.

Que puedan conllevar a:

- ✓ Incendio (de charco, de dardo, de llamarada, bola de fuego, otros),
- ✓ Explosión (físicas y químicas, confinadas o no confinadas, BLEVE, por polvo, descomposición térmica, reacciones fuera de control),
- ✓ Fuga tóxica (emisión o escape de sustancias nocivas y/o tóxicas para la salud de las personas o para el medio ambiente).

En el proceso de identificación de los peligros o factores de riesgo se recomienda:

- ✓ Incluir todos los escenarios con posibles fugas que conduzcan a pérdidas de contención,
- ✓ Analizar todos y cada uno de los equipos, bombas y tuberías de la instalación,
- ✓ Propiciar el enfoque participativo que involucre personal de diferentes especialidades, los peligros a los que correspondan las mayores consecuencias deben ser identificados a través del trabajo en equipo,
- ✓ Valorar la existencia o no de posibles fuentes de ignición para los probables accidentes de incendio y/o explosión.
- ✓ Conocer las medidas de seguridad existentes que pueden actuar en las diferentes etapas de los accidentes.
- ✓ Considerar las secuencias dominó desde este paso, de esta forma se puede identificar el conjunto de peligros que tienen potencial para propagarse e intensificar sus consecuencias y frecuencia y
- ✓ Elaborar una tabla de escenarios representativos por cada equipo analizado, se define escenario y su frecuencia estimada según reportes de la literatura.

2.3. Identificación y clasificación de las unidades creíbles de accidente mayor (Cuadro No.3)

En esta metodología para la clasificación de las unidades de accidente mayor probable se toma como base la Resolución 148/2013 del Citma, que define un **accidente mayor** como cualquier incidente del proceso, como puede ser, una gran fuga, derrame, incendio o explosión, que se produce como resultado de la pérdida de control sobre un determinado proceso durante la operación de una instalación; y que supone un grave peligro para la salud humana y el medio ambiente, ocasionando un grave daño, ya sea inmediato o retardado; tanto dentro como fuera de la instalación, y que involucra uno o más productos químicos peligrosos.

Conocida esta definición se pudiera pensar que cualquier evento que simplemente cumpliera con su texto pasaría directamente a la lista de los riesgos potenciales, pero en la práctica no ocurre así, debido a que la definición es muy general y puede conducir a diferentes interpretaciones del concepto.

La correcta aplicación de las técnicas de identificación en el *epígrafe 2.2*, debe facilitar el posterior ordenamiento lógico en función de su grado de peligrosidad de los factores de riesgo identificados, permitiendo la clasificación de las unidades creíbles de accidente mayor. Para representar la clasificación se recomienda utilizar una tabla del panorama de factores de riesgo identificados o una matriz de riesgo como *el ejemplo* de la *Figura 2.2*.

MATRIZ DE RIESGO						
Frecuente						FRECUENCIA
Posible						
Raro						
Muy Raro						
Improbable						
	Insignificante	Limitado	Serio	Muy serio	Catastrófico	
CONSECUENCIAS						

Figura 2.2. Ejemplo de matriz de riesgo para la clasificación de las unidades creíbles de accidente mayor

La ubicación, a criterio de los expertos, de cada uno de los peligros identificados en dependencia de la magnitud esperada de sus consecuencias y de la frecuencia probable de ocurrencia, en las diferentes zonas de la matriz permitirá un ordenamiento de las unidades creíbles de accidente mayor. Aquellas unidades (o sus correspondientes factores de riesgo) que se ubiquen en la zona roja de la matriz (extremo superior derecho) son potencialmente generadoras o estarán expuestas a peligro mayor, y por consiguiente se recomienda evaluar por el QRA como unidad primaria, y posteriormente considerar su posible afectación a otras unidades vecinas.

2.4. Especificación de la unidad primaria (Cuadro No.4)

Se selecciona la unidad primaria por el orden de la clasificación de los factores de riesgo de accidente mayor del epígrafe 2.3.

Para facilitar la especificación de la unidad primaria de ED seleccionada, se recomienda tener en cuenta los siguientes aspectos (resumen del análisis bibliográfico del Capítulo I y Anexo II):

- ✓ Escenario Primario: es donde se inicia el ED, propagándose e intensificándose, al afectar otras unidades de proceso o de almacenamiento, desencadenando uno o varios escenarios de accidentes secundarios.
- ✓ Los escenarios primarios de accidente mayor más frecuentes son: incendio de charco (*pool fire*); chorro de fuego (*jet fire*); bola de fuego (*fireball*); llamarada (*flash fire*); explosión no confinada; explosión confinada; BLEVE; entre otros.
- ✓ La mayoría de los eventos ED: se originan en las instalaciones fijas, las más comunes son las unidades de almacenamiento y proceso.
- ✓ Las sustancias más frecuentemente en ED: los combustibles (89% del total), y de estos el Gas Licuado del Petróleo (26,7%), el petróleo (11,1%) y la gasolina (10,7%).
- ✓ Causas del evento primario: eventos externos (30,7%); fallas mecánicas (28,9%); factor humano (20,9%); falla por impacto (17,8%); reacción fuera de control (9,3%); falla de instrumentos (3,6%); condiciones alteradas del proceso (2,2%); fallas de servicio (1,3%).

2.5. Definición de los valores umbrales de intensificación (Cuadro No.5)

En este paso, una vez identificadas y clasificadas las unidades creíbles de accidente mayor (*epígrafe 2.3*) y, dentro de ellas, seleccionada la unidad primaria (*epígrafe 2.4*), deben asumirse los valores umbrales de intensificación, que se definen como la carga máxima que un equipo es capaz de resistir sin que ocurra el fallo.

Los valores umbrales, para las diferentes categorías de equipos, generalmente se asumen de bases de datos disponibles, lo que trae asociado un alto grado de incertidumbre debido a la gran diferencia de valores propuestos.

Las distancias de seguridad establecidas por las diferentes normas, para evitar el impacto de los vectores de intensificación de la unidad primaria, están en un rango desde decenas a centenas de metros, en dependencia de los valores umbrales asumidos.

A continuación se resumen en forma de tablas (*Tablas 2.1-2.5*), varias de las propuestas de la literatura técnica con el objetivo de facilitar el proceso de selección de los valores umbrales de intensificación para diferentes vectores y categoría de equipos de la industria de procesos y, por consiguiente, la aplicación adecuada de la metodología propuesta.

Tabla 2.1. Valores umbrales de intensificación para diferentes vectores de intensificación, (Cozzani et al., 2006)

Vector de intensificación	Umbral	Categoría del equipo	Referencias
Radiación (kW/m ²)	9,5	Todos	Tan (1967)
	12,5	Todos	DM 151/2001
	15,6	Todos	API RP 510 (1990)
	24,0	Todos	Bagster and Pitblado (1991)
	37,0	Todos	Khan and Abbasi (1998)
	37,5	Todos	HSE (1978); BS 5908 (1990); Mecklenburgh (1985)
	38,0	Todos	Kletz (1980)
Sobrepresión (kPa)	7,0	Atmosférico	Gledhill and Lines (1998)
	10,0	Atmosférico	Kletz (1980); Barton (1995); Bottelberghs and Ale (1996);
	14,0	Atmosférico	Gugan (1979)
	20,3	Atmosférico	Brasie and Simpson (1968)
	20,7	Atmosférico	Clancey (1972)
	23,8	Atmosférico	Glasstone (1980)
	30,0	Todos	Bottelberghs and Ale (1996); DM 151/2001
	35,0	Todos	Wells (1980); Gledhill and Lines (1998)
	38,0	Presurizado	Bagster and Pitblado (1991)
	42,0	Presurizado	Cozzani and Salzano (2004)
	55,0	Presurizado	Glasstone (1980)
	65,0	Presurizado	Brasie and Simpson (1968)
Distancia de los fragmentos (m)	800	Todos	DM 151/2001
	1150	Todos	Tan (1967)

Tabla 2.2. Valores umbrales de sobrepresión por categorías de equipos (Mingguang and Juncheng, 2008)

Valores umbrales (kPa)					
Vector de intensificación	Tanques presurizados	Tanques atmosféricos	Equipos alargados (columnas)	Equipos cortos (auxiliares)	Consecuencias
Sobrepresión	$\Delta P > 58$	$\Delta P > 33$	$\Delta P > 46$	$\Delta P > 56$	DS2LI3
	$58 \geq \Delta P \geq 32$	$33 \geq \Delta P \geq 15$	$46 \geq \Delta P \geq 24$	$56 \geq \Delta P \geq 29$	DS2LI2
	$32 \geq \Delta P \geq 18$	$15 \geq \Delta P \geq 8$	$24 \geq \Delta P \geq 16$	$29 \geq \Delta P \geq 22$	DS1LII
	$P < 18$	$P < 8$	$P < 16$	$P < 22$	Sin consecuencias

Los valores umbrales de las *Tabla 2.2* y *2.5* están asociados con los estados de daños (DS) y las clases de intensidades de pérdidas (LI), debido a la exposición a la sobrepresión, donde:

- **DS1:** Daño ligero a las estructuras o al equipamiento auxiliar.
- **DS2:** Daño intenso o catastrófico el cual sin duda alguna será seguido por una intensa pérdida de contención
- **LI1:** Pérdida menor, definida como la pérdida parcial del contenido del recipiente o la pérdida total del contenido en un intervalo de tiempo mayor de 10 minutos.
- **LI2:** Pérdida intensa, definida como la pérdida total del contenido dentro de los 10 minutos.
- **LI3:** Pérdida catastrófica, definida como la pérdida instantánea del contenido.

Tabla 2.3. Valores umbrales para diferentes vectores de intensificación (Cozzani et al., 2006)

Accidente primario	Vector de Intensificación	Categoría del equipo	Valor Umbral
<i>Bola de fuego</i>	<i>Radiación térmica</i>	<i>Atmosférico</i>	<i>15 kW/m²</i>
		<i>Presurizado</i>	<i>50 kW/m²</i>
<i>Dardo de fuego</i>	<i>Radiación térmica</i>	<i>Atmosférico</i>	<i>15 kW/m²</i>
		<i>Presurizado</i>	<i>50 kW/m²</i>
<i>Incendio de charco</i>	<i>Radiación térmica</i>	<i>Atmosférico</i>	<i>15 kW/m²</i>
		<i>Presurizado</i>	<i>50 kW/m²</i>
<i>Explosión de una nube de vapor</i>	<i>Sobrepresión</i>	<i>Atmosférico</i>	<i>22 kPa</i>
		<i>Presurizado</i>	<i>16 kPa</i>
<i>BLEVE</i>	<i>Sobrepresión</i>	<i>Atmosférico</i>	<i>22 kPa</i>
		<i>Presurizado</i>	<i>16 kPa</i>
	<i>Proyección de fragmentos</i>	<i>Cualquiera</i>	<i>No definido</i>
<i>Explosión física</i>	<i>Sobrepresión</i>	<i>Atmosférico</i>	<i>22 kPa</i>
		<i>Presurizado</i>	<i>16 kPa</i>
	<i>Proyección de fragmentos</i>	<i>Cualquiera</i>	<i>No definido</i>

Tabla 2.4. Valores umbrales para el vector dardo de fuego (Tong et al. 2013)

Flujo de calor (kW/m ²)	Daños sobre las personas	Daños sobre los equipos
<i>6.5</i>	<i>Muertes</i>	
<i>4.3</i>	<i>Daños serios</i>	
<i>1.9</i>	<i>Daños menores</i>	
<i>100</i>		<i>Totalmente destruidos</i>
<i>35</i>		<i>Seriamente dañados</i>
<i>25</i>		<i>Deformación en los componentes estructurales</i>

Tabla 2.5. Valores umbrales debido a la exposición a cargas de calor para las diferentes categorías de equipos (Antonioni et al, 2009; Cozzani et al, 2006; Landucci et al, 2009)

Escenario	Vector de intensificación	Valores umbrales (kW/m ²)		Consecuencias
		Tanques presurizados	Tanques abiertos a la atmósfera	
Bola de fuego	Radiación	$I \geq 100$	$I \geq 100$	DS1LI1
		$I < 100$	$I < 100$	Sin consecuencias
	Envuelto en llamas	$I \geq 100$	$I \geq 100$	DS1LI1
		$I < 100$	$I < 100$	Sin consecuencias
Dardo de fuego	Afectación directa por el fuego	$d_j \geq d$	$d_j \geq d$	DS2LI3
	Radiación	$I \geq 60; t_j \geq 10$	$I \geq 15; t_j \geq 10$	DS2LI2
		$I \geq 40; t_j \geq 10$	$I \geq 8; t_j \geq 10$	DS1LI1
		$I < 40$	$I < 8$	Sin consecuencias
Llamarada	Afectación directa por el fuego	Improbable	Improbable	Sin consecuencias
Incendio de charco	Envuelto en llamas	$d_p \geq d$	$d_p \geq d$	DS2LI3
	Radiación	$I \geq 60; t_p \geq 10$	$I \geq 15; t_p \geq 10$	DS2LI2
		$I \geq 40; t_p \geq 10$	$I \geq 8; t_p \geq 10$	DS1LI1
		$I < 40$	$I < 8$	Sin consecuencias

donde: d_j : longitud del dardo (m); d_p : diámetro del charco (m); d : distancia entre los tanques (m); t_j : duración del dardo de fuego (min); t_p : duración del incendio de charco (min).

2.6. Análisis de frecuencia y consecuencias del accidente primario (Cuadro No.6)

En este paso se evaluará el riesgo en la unidad primaria seleccionada (en cada ciclo de la metodología), para lo cual se tomará como base la matriz de riesgo, *Figura 2.2*, elaborada preliminarmente a criterio de los expertos que dirigen el estudio QRA. La matriz de referencia permitió identificar y clasificar las unidades creíbles de accidente mayor, y su posterior especificación en el *epígrafe 2.4*.

2.6.1. Frecuencia de ocurrencia del accidente primario

Independientemente del método seleccionado, para realizar una estimación fiable de la frecuencia de ocurrencia de los accidentes resulta crucial la tenencia de datos bien fundamentados de las tasas de fallos. Sin embargo, debido al hecho de que es difícil encontrar datos estadísticos de las tasas de fallo para todos los componentes de un sistema, la estimación de la frecuencia de fallo a menudo tiene que ser combinada con algunas suposiciones.

La industria química presenta generalmente un alto grado de complejidad, por lo que para el análisis de estos sistemas se toman como requisito previo las simplificaciones, pero estas contribuyen al incremento de la incertidumbre, por lo que la fiabilidad de los resultados pudiera ser cuestionable.

Para la aplicación de esta metodología, la probabilidad del accidente primario se puede obtener, de forma alternativa a partir de datos genéricos disponibles en diferentes fuentes bibliográficas o mediante la realización de un análisis de árbol de eventos o un árbol de fallos. Se recomienda considerar el criterio de corte de frecuencia por encima de 10^{-8} años⁻¹.

2.6.2. Cálculo de las consecuencias del accidente primario

En el análisis de las consecuencias del accidente primario, se deben seguir los siguientes pasos:

- ✓ Analizar los escenarios de fuga de sustancias peligrosas. Para este análisis inicial, los datos más importantes son la velocidad de liberación, la duración de la fuga, la cantidad de sustancia peligrosa que se libera y las condiciones ambientales en el momento del evento.
- ✓ El siguiente paso en el análisis de consecuencias depende de si la sustancia liberada es inflamable o tóxica:
 - En las emisiones tóxicas se evalúa el modelo de dispersión y los efectos tóxicos de la sustancia liberada.
 - Si la sustancia liberada es inflamable, el evento peligroso puede manifestarse en forma de incendio y/o explosión.

Escape tóxico: Los modelos de **dispersión** pueden ser evaluados con el ALOHA, este software puede ser utilizado en la evaluación de las consecuencias de todos los principales eventos graves, en el caso de la dispersión tóxica es particularmente eficiente.

Incendio: Se evalúan los efectos de la **radiación térmica**. El método a utilizar para evaluar la radiación emitida dependerá del tipo de incendio: incendio de charco, dardo de fuego, llamarada o bola de fuego. Existen varias herramientas computacionales para el análisis de las consecuencias, *por ejemplo*, ALOHA, PHAST, HAZDIG, y otras.

Explosión: Además de la **radiación térmica** que generalmente acompaña a este fenómeno, se evalúan los efectos de **sobrepresión** (onda de choque o proyección de fragmentos) mediante modelos de puntos de origen o puntos de fuentes, *por ejemplo*: modelos TNT equivalente; modelos multi-niveles, tales como los modelos de multi-energía y Baker-Strehlow, entre otros. La explosión BLEVE, fenómeno muy común y de consecuencias catastróficas en la industria química, también puede ser evaluada con herramientas computacionales, tales como el ALOHA.

A modo de *ejemplo* de la utilización del ALOHA, en la *Figura 2.3* se representan los radios de afectación para tres valores de radiación térmica (10.0; 5.0 y 2.0 kW/m²) con los riesgos potenciales para las personas expuestas.

Es importante recordar que todos estos métodos o herramientas computacionales representan una simplificación de la realidad y que los datos de entrada tienen un gran porcentaje de incertidumbre.

Los resultados de la evaluación cuantitativa del riesgo de accidente mayor deben expresarse en daños materiales y las personas expuestas en un área definida.

El radio de afectación calculado se considerará para los efectos de esta metodología como la curva iso-riesgo del fenómeno en cuestión.

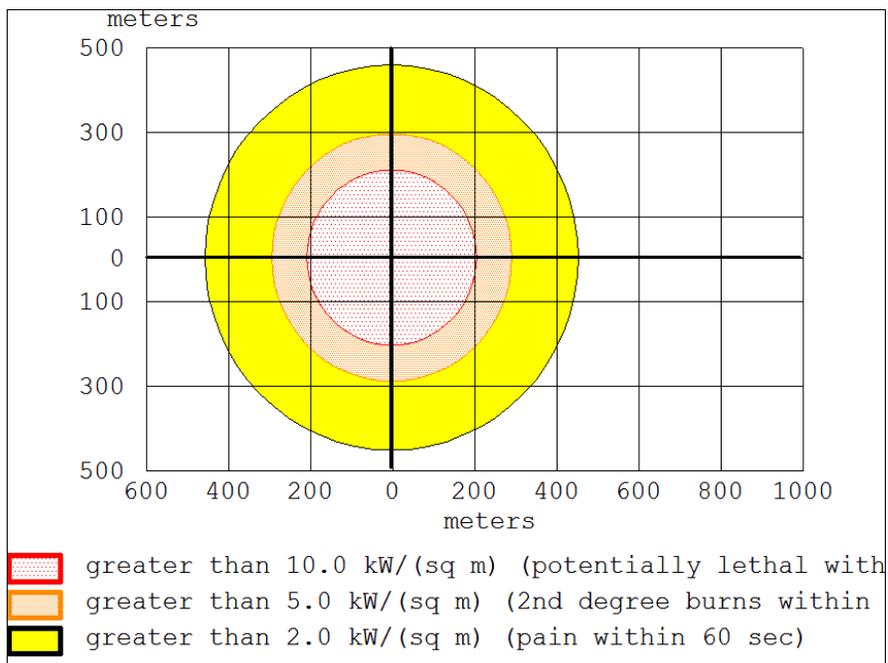


Figura 2.3. Ejemplo de la representación del ALOHA de los radios de afectación por radiación térmica

2.7. Cálculo de los vectores de intensificación (Cuadro No.7)

Los vectores de intensificación, efectos físicos de un accidente, se definen en función del tipo de accidente primario, en el epígrafe 2.4 se relacionan los más frecuentes en accidentes mayores con probabilidad de generar efecto dominó, y en la *Tabla 2.6* se presenta una relación entre los accidentes primarios más frecuentes y los vectores de intensificación que los caracterizan.

Tabla 2.6. Accidentes primarios frecuentes y los vectores de intensificación que generan

ACCIDENTE PRIMARIO*	VECTOR DE INTENSIFICACIÓN
Incendio de charco (<i>pool fire</i>)	Radiación, daños por el fuego
Dardo de fuego (<i>jet fire</i>)	Radiación, daños por el fuego
Bola de fuego (<i>fireball</i>)	Radiación, daños por el fuego
Llamarada (<i>flash fire</i>)	Daños por el fuego
Explosión mecánica	Proyección de fragmentos, sobrepresión
Explosión confinada	Sobrepresión
Explosión BLEVE	Proyección de fragmentos, sobrepresión
Explosión de vapor confinado (VCE)	Sobrepresión, daños por el fuego
Escape tóxico	Nube tóxica

*Todos estos accidentes pueden ser desencadenados por vectores de intensificación generados en otro accidente externo o anterior.

El cálculo de estos vectores se trató en el punto anterior, es decir al definir las consecuencias del accidente primario se están calculando las intensidades de los vectores de intensificación.

En este paso es fundamental que los valores calculados de las consecuencias de los vectores de intensificación para el accidente sean ajustados para diferentes distancias dentro de los valores umbrales definidos en el *epígrafe 2.5*, con la finalidad de valorar los posibles daños de las unidades destino, al comparar en el siguiente paso (*epígrafe 2.8*) los radios de afectación y la ubicación espacial real de cada unidad dentro la instalación en estudio.

2.8. Comparación de los vectores de intensificación con los valores umbrales (Cuadro No.8)

El análisis de consecuencias del accidente primario nos brinda una zona de afectación, producto de los vectores de intensificación del accidente primario, si comparamos esta zona de afectación con los valores umbrales de los posibles equipos afectados o unidades destino dentro de esta zona, podremos identificar todos las unidades que sufrirán daños debido a la exposición de los vectores de intensificación.

En este punto es recomendable graficar sobre un plano de planta de la instalación en estudio los radios o distancias de afectación obtenidos en los cálculos de consecuencias de cada vector de intensificación.

2.9. ¿Es posible la propagación? (Cuadro No.9)

Al comparar los vectores de intensificación del accidente primario con los valores umbrales para cada unidad destino probable, es posible responder a esta interrogante. Toda unidad destino que esté dentro del área afectada por valores superiores al valor umbral y que el tiempo de exposición supere al tiempo hasta el fallo de cada equipo expuesto, tendrá posibilidad de propagar el accidente primario.

2.10. Identificación de las unidades destino con potencial de intensificación (Cuadro No.10)

En este paso se identifican todas las unidades destino producto del accidente primario, a partir de los resultados de la posible propagación en un primer momento, respuesta positiva en el *epígrafe 2.9*, y luego se hace cíclica siempre que sea posible un nivel superior de intensificación, respuesta positiva en el *epígrafe 2.17*.

Si la propagación es considerada como posible, el próximo paso sería analizar cuáles de las unidades destino pueden contribuir en un aumento de las consecuencias del accidente primario, significando esto que la intensificación es posible.

Para lograr una mejor identificación de los equipos o unidades destino se hace necesario conocer cuál sería, en dependencia del accidente primario, la cadena de accidentes con mayores posibilidades de desarrollo.

Para esta definición es recomendable apoyarse en los datos estadísticos publicados en bases de datos y artículos científicos, en el Capítulo I se hace un análisis bibliográfico de numerosas fuentes. Vale aclarar que la definición de la cadena del ED estará en dependencia del caso de estudio y su complejidad.

2.11. Cálculo de los valores Probit en cada unidad destino (Cuadro No.11)

Con el objetivo de facilitar la aplicación práctica de esta metodología se proponen las *Tablas 2.7 y 2.8* con funciones Probit para equipos expuestos a **radiación térmica** y **sobrepresión**, seleccionadas y resumidas de la bibliografía analizada, estas ecuaciones permitirán determinar la probabilidad de daños en cada unidad destino.

Para la radiación térmica se tiene en cuenta el vector de intensificación, intensidad de la radiación (I , kW/m²), el volumen (V , m³) y la categoría del equipo expuesto, así como el tiempo hasta el fallo (tff , s) de esta unidad destino. Para el vector sobrepresión se considera la categoría del equipamiento y el diferencial de presión que se genera en la explosión (ΔPa , Pa)

Tabla 2.7. Funciones probit para el cálculo de la probabilidad de daños en equipos expuestos a la radiación térmica

Categoría del equipamiento	Funciones Probit
Recipientes atmosféricos (25 – 17500 m ³ , 0.1 MPa)	$y = 9.25 - 1.85 * \ln\left(\frac{tff}{60}\right)$ $\ln(tff) = -1.13 \ln(I) - 2.67 * 10^{-5} * V + 9.9$
Recipientes a presión (5 – 250 m ³ , 1.5 – 2.5 MPa)	$y = 9.25 - 1.85 * \ln\left(\frac{tff}{60}\right)$
Fuente de radiación distante Envuelto por las llamas	$\ln(tff) = -0.95 \ln(I) + 8.845 * V^{0.032}$ $\ln(tff) = -1.29 \ln(I) + 10.971 * V^{0.026}$

Tabla 2.8. Funciones probit para el cálculo de la probabilidad de daños en equipos expuestos a la sobrepresión

Categoría del equipamiento	Funciones Probit
Recipientes atmosféricos	$Y = -9.36 + 1.43 \ln(\Delta Pa)$
Recipientes a presión	$Y = -14.44 + 1.82 \ln(\Delta Pa)$
Equipos alargados (columnas)	$Y = -12.22 + 1.65 \ln(\Delta Pa)$
Equipos cortos (auxiliares)	$Y = -12.42 + 1.64 \ln(\Delta Pa)$

Consideraciones específicas

- ✓ Según los reportes bibliográficos, el tiempo hasta el fallo (tff) de cualquier recipiente atmosférico expuesto a una **radiación térmica** proveniente de una fuente distante con intensidad inferior a 15 kW/m² debe ser mayor de 10 minutos y mayor de 30 minutos para la intensidad de radiación inferior a 10 kW/m². En el caso de los recipientes a presión, el tff será superior a 10 minutos para una intensidad de radiación térmica proveniente de una fuente distante de 60 kW/m² y superior a 30 minutos para la intensidad de radiación inferior a 45 kW/m². El tff para el recipiente a presión dependerá de la presión de diseño, entre 1,5 y 2,5 MPa (*Tabla 2.7*).
- ✓ Para que se produzcan los daños y la intensificación o escalado del accidente inicial debido a la **proyección de fragmentos** se requieren de dos condiciones: la distancia al equipo destino debe ser menor que la distancia máxima de proyección creíble y el impacto debe ser seguido de una pérdida de contención.
- ✓ El análisis histórico muestra que la proyección y el **impacto de los fragmentos** es una causa creíble de intensificación o escalado. El mecanismo de intensificación o escalado es complejo, e involucra tres fases

principales: la formación del fragmento, la proyección del fragmento y el vuelo y daño por el impacto del fragmento.

- ✓ Una probabilidad conservadora de impacto podría estimarse en $2.5 \cdot 10^{-1}$ a 100 metros y de $2.5 \cdot 10^{-2}$ a 300 metros. La distancia de seguridad para la intensificación debido a la **proyección de un fragmento** proveniente de un BLEVE o una explosión mecánica puede ser superior a los 1000 metros. La distancia de seguridad sugerida puede ser comparada con la distancia de 900 metros, la cual ha sido observada en los análisis históricos de accidentes que involucran instalaciones de recipientes de almacenamiento con una distribución común.

2.12. Clasificación relativa del riesgo de efecto dominó en cada unidad destino (Cuadro No.12)

La clasificación relativa se hará ordenando de mayor a menor el riesgo probable de cada una de las unidades destino, en los diferentes niveles de intensificación del efecto dominó.

Para la clasificación relativa del riesgo se debe tener en cuenta al menos los **siguientes factores**:

- ✓ ¿Cuáles de las sustancias presentes son inflamables?
- ✓ ¿Qué cantidad de sustancia inflamable se procesa o almacena?
- ✓ Parámetros tecnológicos (presión, temperatura, nivel, flujo, concentración, otros)
- ✓ Estado de agregación de la sustancia inflamable presente.
- ✓ Material de construcción del recipiente que almacena la sustancia inflamable.
- ✓ Probabilidad real de ignición (fuentes presentes).
- ✓ Posición relativa de las unidades destino (disposición en planta).
- ✓ Medidas de seguridad en la instalación y cómo éstas pueden afectar los escenarios de accidentes, *por ejemplo*, un tanque que contenga gasolina y no tenga un cubeto que lo proteja de una fuga de material inflamable de un equipo vecino, en caso de ignición, completamente quedará envuelto por las llamas con elevado potencial de intensificación, sin embargo de tener el cubeto puede evitar la amenaza de intensificación.
- ✓ Se considera como un ED, la cadena de eventos que incrementa en conjunto todas las consecuencias, un nivel superior con menor potencial de intensificación que el evento primario, deberá ser excluido del análisis.
- ✓ EL ED debe abordarse con un enfoque sistémico para evitar la referencia circular, muchas unidades contienen sustancias peligrosas y generalmente están ubicadas unas muy cerca de las otras, se recomienda que se realice una clasificación relativa del riesgo dominó, los equipos destino dentro de la zona de afectación deberán ser clasificados en función de su potencial para intensificar las consecuencias.

- ✓ El riesgo de dos o más unidades que exploten simultáneamente es preferible clasificarlos como escenarios diferentes del ED. Sin embargo, la consecuencia general de varias unidades que sufren el daño de manera simultánea tiene que ser mayor que la consecuencia individual de la unidad de mayor potencial del ED.

2.13. Estimación de las probabilidades de daños en cada unidad destino (Cuadro No.13)

El posible daño que reciba un equipo de proceso puede ser debido a su exposición a los diferentes vectores de intensificación: radiación térmica, sobrepresión y proyección de fragmentos. La intensificación del accidente primario va a estar influenciada tanto por las características específicas de los vectores de intensificación como por las especificaciones de diseño y tecnológicas de los equipos destino.

Para la estimación de las probabilidades de daños se tomaran en cuenta los valores Probit calculados en el *epígrafe 2.11* para los diferentes vectores de intensificación y unidades destino, convirtiéndose a valores de probabilidad.

2.14. Estimación del estado de daños e intensidad de pérdidas en cada unidad destino (Cuadro No.14)

En el Capítulo I, a partir del análisis bibliográfico, quedó definido que la estimación de las intensidades de pérdidas de contención (LI) y su relación con los estados de daños (DS), permite que sean valoradas cuantitativamente las consecuencias del escenario secundario, por lo tanto, resultan un elemento importante en la estructura para la valoración del riesgo del efecto dominó. También permite una estimación del costo asociado a los daños y además puede ser utilizado para valorar las pérdidas por paradas o tiempo perdido por los accidentes.

En la *Tabla 2.9* se resumen las correlaciones entre las clases LI y las categorías DS, estas definiciones son las más comunes encontradas en el análisis bibliográfico de varios artículos y están basadas en el análisis histórico de accidentes.

Tabla 2.9. Resumen de la relación entre las clases de intensidades de pérdidas y categorías de estados de daños

Eventos secundarios para materiales inflamables					
Daño estructural	Pérdida de contención	Tipo de equipo destino			
		Atmosférico	Presurizado	Alargados	Pequeños
DS1	LI1	Piscina de fuego menor	Dardo de fuego menor	Piscina de fuego menor	Piscina de fuego menor
				Llamarada menor	Llamarada menor
DS2	LI2	Piscina de fuego	Dardo de fuego	Piscina de fuego	Piscina de fuego menor
		Llamarada	Llamarada	Llamarada	Llamarada menor
		VCE	VCE	VCE	
DS2	LI3	Piscina de fuego	BLEVE/Bola de fuego	Piscina de fuego	Piscina de fuego menor
		llamarada	llamarada	llamarada	Llamarada menor
		VCE	VCE	VCE	

donde: **DS1**: Daño ligero a las estructuras o al equipamiento auxiliar; **DS2**: Daño intenso o catastrófico, seguido por una intensa pérdida de contención; **LI1**: Pérdida menor, definida como la pérdida parcial del contenido del recipiente o la pérdida total del contenido en un intervalo de tiempo mayor de 10 minutos; **LI2**: Pérdida intensa, definida como la pérdida total del contenido dentro de los 10 minutos; **LI3**: Pérdida catastrófica, definida como la pérdida instantánea del contenido.

2.15. Identificación y cálculo de los vectores de intensificación en cada unidad destino (Cuadro No.15)

Para la identificación de los vectores de intensificación en cada unidad destino se parte de los escenarios y vectores seleccionados y calculados en el nivel primario y de la cadena de intensificación de vectores más probable (en este caso se deben utilizar los reportes de probabilidad de las bases de datos de accidentes y artículos científicos). Este paso tiene la finalidad de suponer cuáles escenarios podrían generarse en las unidades destino con potencialidad para extender la cadena de eventos y dañar a otras unidades (niveles superiores del ED).

Para el cálculo de los vectores intensificación en las unidades destino se utiliza los mismos procedimientos y herramientas descritos para la unidad primaria, *epígrafes 2.6 y 2.7*.

2.16. Cálculo de consecuencias de los vectores de intensificación en cada unidad destino (Cuadro No.16)

A partir de los resultados del cálculo de los vectores de intensificación que se generan en cada unidad destino con potencialidad de dañar a otras unidades vecinas, se recomienda determinar puntualmente el comportamiento de cada vector de intensificación, para lo cual se recomienda simular el escenario y sus efectos correspondientes con el *software* ALOHA, para cada coordenada de la ubicación en planta de todas las unidades probables a ser afectadas.

El resultado del cálculo de las consecuencias de los vectores de intensificación en cada unidad destino deberá ser ser graficado y comparado con los valores umbrales. En este caso se recomiendan los mismos procedimientos y herramientas descritos para la unidad primaria, *epígrafe 2.8*.

Se deberá tener en cuenta que una unidad destino puede estar expuesta simultáneamente a diferentes fuentes de riesgos provocadas por los efectos físicos o vectores de intensificación (efecto de sinergia). El ED está vinculado con un elevado grado de complejidad y si se incorpora el efecto sinérgico al análisis, es muy probable que la complejidad se incrementaría a proporciones incontrolables.

En la bibliografía no se reporta ningún un *software* que incluya todos los aspectos relacionados con el efecto dominó, por lo que se hace necesario tener en cuenta algunas simplificaciones con el fin de poder llevar a cabo el análisis del ED en consecuencia con un lapso de tiempo aceptable y de acuerdo a las limitaciones en cuanto a programas computacionales existentes, por lo tanto resulta perfectamente aceptable analizar las consecuencias del ED de forma independiente desatendiendo la valoración de un posible efecto sinérgico.

2.17. ¿Es posible un nivel de intensificación superior? (Cuadro No.17)

Mediante el análisis de las consecuencias de los vectores de intensificación provenientes de cada unidad destino, se podrá calcular la zona de efecto para cada escenario de accidente. Si dentro de esta zona de efecto se localizan otras unidades que pueden resultar dañadas, significa que es posible un nivel superior de intensificación y consecuentemente será necesario analizar los niveles superiores intensificación, y se haría repitiendo los procedimientos descritos entre los *epígrafes 10 y 16*.

Para dar respuesta positiva a esta interrogante se deben cumplirse las siguientes condiciones, que:

- ✓ el valor del vector de intensificación supere el valor umbral seleccionado para cada caso.
- ✓ la probabilidad de afectación del equipo o unidad destino, a partir de los valores Probit calculados, sea mayor que cero.
- ✓ el tiempo de afectación real del vector de intensificación sea superior al tiempo hasta el fallo del equipo o unidad destino.

2.18. ¿Se analizaron todos los eventos primarios? (Cuadro No.18)

De ser negativa la respuesta se regresa al *epígrafe 2.4*, y se repite todo el proceso cíclico de la metodología, comenzando por el evento primario, que sigue en el orden definido en el *epígrafe 2.3*. Este ciclo debe repetirse tantas veces como unidades primarias sean seleccionadas como creíbles en una instalación, objeto de estudio. Si la respuesta es afirmativa, se pasa al *epígrafe 2.19*.

2.19. Cálculo de la frecuencia y consecuencias totales (Cuadro No.19)

Cálculo de la frecuencia del ED

En este *epígrafe* se debe calcular la frecuencia y consecuencias totales de los escenarios o eventos evaluados por la metodología, en un QRA convencional, es decir sin ED, pudiera ser resumido como la suma de los resultados parciales de las consecuencias y la valoración de la frecuencia de los eventos individuales, en un rango de probabilidades.

En la evaluación del ED, debido fundamentalmente a lo complejo del análisis, se necesitan grandes requerimientos computacionales, la valoración cuantitativa de los escenarios de efecto dominó en una instalación industrial compleja requiere considerar un número enorme de posibles escenarios, está demostrado que para un escenario primario con capacidad de dañar a **n** equipos son posibles **2ⁿ-1** diferentes escenarios con ED, *por ejemplo*, un accidente primario que afecte 10 equipos tendrá 1023 posibles escenarios ED.

Para los efectos de esta metodología y en función del alcance y contexto del análisis de riesgo cuantitativo que se desea realizar, *epígrafe 2.1*, existen muchos enfoques convencionales entre los que destacan los análisis mediante el árbol de eventos y el de fallas. Quedando claro que independientemente de la técnica de análisis que se adopte, el proceso en el que el ED se puede explicar en un QRA sigue siendo el mismo, y consiste en:

- ✓ Investigar si hay equipos o unidades destino que pueden ser dañados por un vector de intensificación después de un accidente inicial, de ser así se estiman la probabilidad de daño por cada equipo destino y los posibles escenarios de accidentes secundarios que pueden seguir.
- ✓ Para los niveles más altos de intensificación, este proceso se repite y continúa hasta que se hayan identificado todos los resultados finales

Consideraciones para la selección del método

- ✓ El análisis de la frecuencia de la cadena de eventos es el **análisis del árbol de eventos** para cada escenario representativo, permitirá que todos los resultados finales puedan ser identificados. De este modo puede explicarse el impacto de todos los eventos con posibilidades de desencadenar una intensificación a las unidades cercanas, lo que lleva a una evaluación más real de los escenarios de accidentes. Para evitar terminar en una referencia circular, los únicos escenarios que se les permitirá propagarse serán aquellos que lo hagan a las unidades que representen una amenaza mayor que el escenario inicial entre todas las unidades vecinas.
- ✓ Un enfoque alternativo para el análisis del **árbol de eventos** sería identificar las unidades críticas que, si se involucran en un accidente conducirían a consecuencias graves. Mediante la realización del análisis de árbol de fallas, donde cada unidad crítica es vista como un evento tope, la frecuencia de estos accidentes de gran severidad puede ser actualizada en relación con el riesgo de ED.
- ✓ En la actualidad las Redes Bayesianas (RB) se han convertido en una de las herramientas más potentes para el análisis de riesgo en general y para el ED en particular. Las RB encuentran un amplio uso en la determinación de la frecuencia de ED ya que entre otras ventajas permite el razonamiento bajo incertidumbre y modelado de un sistema de dependencias. Una metodología basada en las RB permite estimar tanto el patrón de propagación como la probabilidad de propagación a diferentes niveles del ED.
- ✓ Mediante el mapeado de árboles de fallos en una red bayesiana, las dependencias entre las diferentes unidades y las incertidumbres en el sistema se pueden capturar mejor que en un análisis de árbol de fallos convencional. Esto se debe principalmente al hecho de que la RB se basa en dependencias probabilísticas mientras que el análisis de árbol de fallos sólo puede manejar dependencias deterministas.

Cálculo de las consecuencias del ED

Para el cálculo de las consecuencias del ED se siguen los mismos pasos ya descritos en el *epígrafe 2.6*, además como se puede ver en la *Figura 1.7 del epígrafe 1.11 del Capítulo I*, el área encerrada dentro de las curvas de iso-riesgo es mayor cuando se tiene en cuenta el ED, lo que deja claro el incremento de las consecuencias cuando se incluye el ED en el *QRA*.

2.20. Representación gráfica de los perfiles de riesgo (Cuadro No.20)

A partir del resumen de los resultados totales obtenidos en el análisis del *epígrafe 2.19*, se construyen las curvas de iso-riesgo de la instalación en estudio, para lo cual se recomienda utilizar un plano de distribución en planta de la instalación a escala y dibujar sobre el mismo las curvas iso-riesgo de cada vector.

Conclusiones parciales

La flexibilidad de la metodología que se propone, permitirá:

1. Aplicar cualquiera de las técnicas de análisis de riesgo cuantitativo tradicionales, sin depender de complejos algoritmos para la evaluación integral de la cadena de eventos del efecto dominó.
2. Determinar el perfil de riesgo para daños materiales con respecto a todos los escenarios probables de accidente mayor, incluyendo los escenarios de efecto dominó potenciales.
3. Analizar el riesgo de daños materiales con respecto al efecto dominó, tanto dentro de un área (riesgo local) como entre diferentes áreas de una misma instalación, así como evaluar el impacto probable a zonas aledañas a la instalación en estudio.
4. Establecer las distancias de seguridad o las zonas de planificación, validadas con respecto a los daños materiales para diferentes valores umbrales, en función de criterios reguladores o normas específicas.



Capítulo III

CAPÍTULO III. Aplicación de la metodología para el análisis cuantitativo de riesgo, considerando la intensificación de los daños por efecto dominó: Caso de estudio Almacén tecnológico de GLP, Santa Clara

El objetivo principal de este capítulo es aplicar la metodología en una instalación real con el fin de evaluar su funcionalidad, validar la adecuación de cada uno de los pasos de la metodología dentro de los límites de tiempo que puedan ser considerados razonables para un *QRA*, así como comprobar si la estructura metodológica propuesta garantiza el flujo necesario para el análisis de riesgo incluyendo el ED.

En el desarrollo de este capítulo se aplica la metodología paso a paso, según lo descrito en el Capítulo II, y cumpliendo el esquema de flujo de la *Figura 2.1*. Se seleccionan y aplican varios métodos de análisis de frecuencia y consecuencias para diferentes escenarios de riesgos creíbles propuestos.

El programa computacional ALOHA 5.4.1 se aplica para el cálculo de los vectores de intensificación de los accidentes probables, así como para la representación de las líneas iso-riesgo de cada una de las fuentes (creíbles) generadoras de daños de la cadena de eventos asumida para el estudio, lo que permitió analizar la secuencia de eventos del ED, tomando como base de análisis el orden más probable de ocurrencia en cada nivel de la cadena.

3.1. Definición del alcance y contexto del análisis de riesgo cuantitativo

El caso de estudio seleccionado consiste en el análisis de riesgo cuantitativo, considerando el efecto dominó en el Almacén Tecnológico de Gas Licuado del Petróleo (GLP) de Santa Clara, ubicado en el Reparto Brisas del Capiro, Santa Clara, Villa Clara (*Figura 3.1*).

El alcance de este estudio, por razones de tiempo, se limitará a evaluar una cadena de eventos probables en este tipo de instalación. Intencionalmente se selecciona la cadena de eventos que con mayor probabilidad, según la bibliografía, conllevará a un posible efecto dominó con consecuencias catastróficas, la finalidad es evaluar la metodología propuesta en todos sus pasos. Aunque esta selección intencionada resulta una simplificación en el complejo análisis cuantitativo, el resultado que se obtiene es válido para la cadena definida.

De los resultados de varias visitas y trabajos de análisis de riesgos anteriores efectuados por el autor y colaboradores a la instalación, caso de estudio, se tomaron los principales datos y las características generales del equipamiento y la sustancia peligrosa, necesarios para la aplicación de esta metodología propuesta.

Superficie que ocupa: El Almacén tecnológico de GLP dispone, dentro de su área cercada, de una superficie total aproximada de 11400 m², aunque la ocupación real del área es muy baja dado a que la superficie construida no supera el 50% del total.

Número de personas expuestas: En la instalación, en horario laboral, coinciden como promedio 15 trabajadores. Se le adicionan dos custodios y tres itinerantes promedio, en tareas de carga de cilindros de GLP para su comercialización. Para este estudio, a los efectos de valorar un posible accidente, se consideró un máximo de 20 personas presentes, expuestas directamente a los daños probables del accidente supuesto

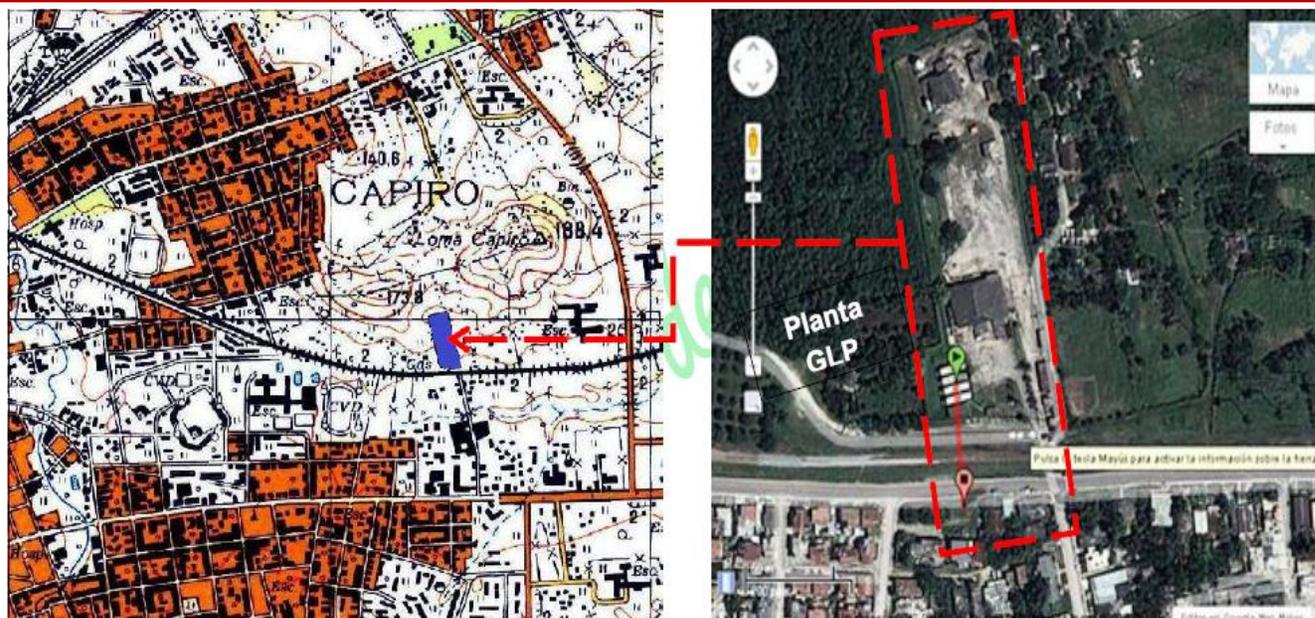


Figura 3.1. Reparto Brisas del Capiro. Santa Clara, Villa Clara. Vista aérea del Almacén tecnológico de GLP

Las principales variables meteorológicas en la zona donde se encuentra ubicada la instalación se presentan en la Tabla 3.1. Los valores de las variables se tomaron para las condiciones meteorológicas en el momento de una de las visitas a la instalación, válidos solamente para este caso de estudio.

Tabla 3.1. Variables meteorológicas asumidas para el caso de estudio

Variable meteorológicas	Valor asumido	Unidad de medida
Temperatura ambiente	35	°C
Humedad relativa	85	%
Presión atmosférica	1017	kPa
Estabilidad Pasquill	D	-
Velocidad del viento	4	m/s
Dirección del viento	NNE	-
Cobertura nubosa	media (5)	-

Para garantizar una mejor comprensión de la aplicabilidad de la metodología se muestrasu desarrollo por las áreas principales del estudio, áreas de riesgo (AR): AR I. Descarga y almacenamiento de GLP; AR II. Nave de operaciones; AR III. Infraestructura y dirección del grupo.

Como fuentes generadoras de riesgos se tomaron las áreas AR I y AR II, Figura 3.2 (a y b). Según se observa, estas áreas se encuentran ubicadas relativamente muy cerca entre sí, por lo que considerar probable el ED entre ellas resulta lógico.

Tomando en consideración, como se ha dicho, que la distribución en planta de la instalación es una de las variables que mayor influencia ejerce sobre el riesgo en un posible ED es necesario definir las distancias relativas entre las diferentes unidades y áreas de riesgo a evaluar, para este caso de estudio las distancias se estimaron,

según se muestra en la *Figura 3.2b*, partiendo de medidas en la imagen del satélite de *Google map*, *Figura 3.2(a)* y mediciones aproximadas en el terreno, lo que se considera como datos aceptables para los objetivos de este estudio.



Figura 3.2. (a) Foto del Almacén tecnológico de GLP. (b) Esquema con las distancia entre las AR en estudio

El análisis de los escenarios de riesgos se realizará de forma independiente para cada una de estas dos áreas, con el objetivo de poder valorar la posibilidad de ED local (en la misma AR) y posteriormente se valorará la posible propagación de los daños a la segunda AR y al resto de la instalación. El AR III, por su naturaleza, no tiene fuentes que pudieran generar un accidente mayor, aunque si pudiera ser dañada por efecto dominó.

3.1.1. Área de riesgo AR I: Descarga y almacenamiento de GLP

Tabla 3.2. Características de las principales unidades dentro del AR I

Recipientes	Tipo de recipiente	Capacidad total * (m ³)	Estado de la sustancia	Presión de trabajo (kg/cm ²)	Temperatura de trabajo (°C)	Volumen de trabajo (m ³)
Bala No.1	Presurizado	99622	Líquido	12	Ambiente	89660
Bala No.2	Presurizado	99609	Líquido	12	Ambiente	89648
Bala No.3	Presurizado	100036	Líquido	12	Ambiente	90032
Bala No.4	Presurizado	100336	Líquido	12	Ambiente	90302
Bala No.5	Presurizado	2431	Líquido	12	Ambiente	2188

*Para los cálculos posteriores se consideraran volúmenes de trabajo de 90m³ en las balas 1-4 y de 2,2m³ en la Bala No.5.

El **ARI** incluye como equipamiento principal los cinco (5) recipientes: de la Bala No.1 a la No.4, son tanques de almacenamiento de GLP, y la Bala No.5 de menor capacidad con la función de recipiente recuperador de GLP, en todos los casos son tanques cilíndricos de acero colocados horizontalmente sobre dos soportes en forma de silleta. Además en el área se disponen los compresores y las bombas para las operaciones con el GLP.



*Figura 3.3. Foto del área de riesgo **ARI**, zona de descarga y almacenamiento de GLP*

En la *Figura 3.3* se muestra una foto, al centro la batería de las cuatro balas de almacenamiento, en el extremo derecho la bala de recuperación y en el extremo izquierdo se ubica el compresor y las bombas.

El GLP llega al Almacén tecnológico en camiones cisternas y se descarga manualmente a las balas 1, 2, 3 y 4 para su almacenamiento.

Las balas de almacenamiento cuentan con los medios y dispositivos de seguridad adecuados (manómetro y válvulas de seguridad).

Esta instalación tiene varios años de uso, y en los recipientes, válvulas y tuberías hay muestras de deterioro por corrosión que pudieran ser fuente de riesgos a tener en cuenta en el análisis, considerando además que en estos recipientes y accesorios, la presión de trabajo de aproximadamente 12 kg/cm².

Para la identificación de los peligros potenciales de accidente mayor y el análisis posterior de riesgo es necesario conocer las características del GLP, que hacen que sea considerado **sustancia peligrosa**.

Características generales de peligrosidad del Gas Licuado del Petróleo (GLP)

- ✓ Combustible, altamente inflamable, se almacena a sobrepresión manteniendo un estado de equilibrio entre su fase líquida y gaseosa, el volumen de GLP líquido en un recipiente se encuentra directamente relacionado con su temperatura, expandiéndose al aumentar la temperatura y contrayéndose al disminuir.
- ✓ A temperatura superior a la temperatura crítica, la fase líquida se transforma instantáneamente en fase gaseosa, aumentando la presión en varias veces su valor de almacenamiento, estallando y destruyendo el recipiente en que se encuentra almacenado.
- ✓ Su límite inferior de explosividad es muy bajo, por ello, la cantidad de producto requerida para crear un medio inflamable y explosivo es pequeña. Las mezclas de GLP gas/aire derivadas de escapes pueden inflamarse a cierta distancia del punto de escape, y la llama regresar a la fuente.
- ✓ Mientras más pequeño sea el tamaño de un recipiente y menor cantidad de GLP contenga, menos tiempo necesita para elevar su temperatura y por tanto, su presión, precisándose una actuación más rápida.
- ✓ La onda expansiva del GLP está en el orden de los 8,6 kgf/cm², sin embargo en literaturas especializadas se hace alusión a que los efectos explosivos de una tonelada de GLP, es equivalente a **0,42 t** de TNT.
- ✓ Al inflamarse bajo un proceso de combustión completa, un kg de GLP desprende una energía calorífica superior a las 10000 kcal/kg, suficiente para crear condiciones desfavorables para el medio en que se encuentre, así como para propagar el incendio hacia el medio colindante por radiación o convección, cuando exista presencia en el mismo de sustancias o materiales combustibles o inflamables.
- ✓ Un kg de GLP es capaz de combustionar en 0,4 seg., siendo imposible evitar su propagación por toda su masa. Esto determina la intensidad de desprendimiento de calor en el incendio, la intensidad de su desarrollo y por consiguiente la temperatura del incendio.
- ✓ Como resultado de la combustión del GLP, los productos de la combustión alcanzan una temperatura superior a los 1000 °C, suficiente para provocar el surgimiento de diferentes focos de combustión durante su desplazamiento por las diferentes áreas tecnológicas o locales.
- ✓ Capaz de estallar como resultado de una reacción química, desprendiendo gran cantidad de energía calorífica en un volumen relativamente limitado y en un corto tiempo.
- ✓ Es más denso que el aire, en caso de escape se desplaza a ras de suelo, posee una significativa velocidad de difusión, lo cual aumenta la probabilidad de ignición. Incoloro e inodoro, no es perceptible por los órganos sensoriales del hombre, lo que dificulta una respuesta inmediata ante un escape.

Tabla 3.3. Propiedades del Gas Licuado del Petróleo (GLP), mezcla (60/40) butano/propano

PROPIEDADES	PROPANO	BUTANO	U/M
Densidad en estado líquido a 20 °C.	500,5	578,9	kg/m ³
Densidad del gas con relación al aire	1,5617	2,0665	-
Densidad relativa (respecto del agua) del líquido a 15.6 °C	0,50-0,51	0,57-0,58	-
Densidad relativa (respecto del aire) del gas a 15.6 °C. y 1 kg/cm ²	1,40-1,55	1,90-2,10	-
Litros de gas/toneladas de líquido a 15.6 °C	1957-2019	1723-1760	-
Relación entre el volumen de gas y líquido a 15.6 °C y 1 kg/cm ²	274	233	-
Temperatura de ebullición a presión normal	- 42,06	- 0,5	°C
Solubilidad en agua a 18 °C	6,5	No	ml/100 ml
Calor de vaporización	101	92	kcal/kg
Presión del gas a 20 °C.	9	2,5	kg/cm ²
Temperatura crítica	96,81	152	°C
Presión crítica	42,1	36,5	kgf/cm ²
Capacidad a electrizarse	Sí	Sí	-
Humedad	0	0	%
Constante específica de los gases	19,25	14,59	kg.m/kg °C
Calor de combustión	11100	10900	kcal/kg °C
Temperatura de auto-inflamación	466	405	°C
Temperatura de inflamación	- 104	68,8	°C
Límite inferior de explosividad	2,1	1,8	% en vol.
Límite superior de explosividad	9,5	9,1	% en vol.
Máxima velocidad normal de combustión	0,455	0,379	m/s
Temperatura de combustión adiabática	1714	1737	°C
Presión máxima de explosión	8,6	8,6	kgf/cm ²
Energía mínima de ignición	0,25	0,25	mJoul
Coefficiente de capacidad térmica	73,51	97,78	kJ/mol °K
Coefficiente de conductividad térmica, 2.38x10 ⁻² a 373 °K	6,3	5,6	W/mol °K
PROPIEDADES GLP, SEGÚN LA NORMA NFPA 58 / 1995	Propano	Butano	
Presión de vapor en kPa a:20 °C	895	103	
40 °C	1482	285	
45 °C	1672	345	
Peso específico	0,504	0,582	
Masa por m ³ de líquido a 15,56 °C, kg	504	582	
Calor específico del líquido, kJ/kg, a 15,56 °C	1464	1276	
Metros cúbicos de vapor por litro de líquido a 15,56 °C	0,271	0,235	
Metros cúbicos de vapor por kg de líquido a 15,56 °C	0,539	0,410	
Peso específico del vapor (aire=1) a 15,56 °C	1,50	2,01	
Temperatura de ignición en aire, °C	493-549	482-538	
Temperatura máxima de llama en aire, °C	1980	2008	
Calor latente de vaporización en el punto de ebullición, kJ/kg	428	388	
Cantidad de calor total luego de la vaporización: kJ/m ³	92430	121280	
kJ/kg	49920	49140	

En este caso de estudio, el GLP que se almacena es una mezcla (60/40) butano/propano, en la *Tabla 3.3* se muestran sus propiedades fundamentales de cada componente y en los cálculos se utilizarán los datos del butano por ser el componente con mayor porcentaje en dicha mezcla.

3.1.2. Área de riesgo **AR II**: Nave de operaciones

Esta área consiste en una nave de operaciones para el llenado-pesaje, verificación, extracción de las válvulas de los cilindros defectuosos, almacenamiento de cilindros aptos y defectuosos, llenos y vacíos.



*Figura 3.4. Foto del área de riesgo **AR II**, Nave de operaciones del Almacén tecnológico de GLP*

El GLP es transportado por tuberías desde las balsas de almacenamiento del **AR I** hasta la línea de llenado de los cilindros de 10 y 45 kg, que es la forma en que el GLP se comercializa.

En espera del llenado o del despacho directo a los clientes, cientos de cilindros vacíos y llenos se almacenan en áreas del interior y exterior de la nave de operaciones, en el exterior expuestos a las inclemencias del tiempo, lo que conlleva al deterioro por corrosión, y la exposición al calentamiento de los rayos del sol tropical puede generar una sobrepresión con explosión en los cilindros llenos, se reportan en la literatura accidentes catastróficos por esta causa.

3.1.3. Área de riesgo **AR III**: Infraestructura y dirección del grupo

Esta área consiste en una edificación de una sola planta donde se ubican las oficinas del grupo de trabajo GLP, no se almacenan sustancias peligrosas que pudieran provocar un accidente mayor, por lo que para los efectos de este caso de estudio, solamente se tomará en consideración como posible unidad destino de los vectores de intensificación de ED que probablemente se generen en las **AR I** y **AR II**.

3.2. Identificación de peligros o factores de riesgo

La identificación de peligros se realizó según las recomendaciones de la metodología, Capítulo II, *epígrafe 2.2*, y tomando en consideración los resultados de anteriores análisis de riesgos, realizados por el autor y colaboradores, en este Almacén tecnológico.

Teniendo en cuenta los reportes bibliográficos analizados en el Capítulo I, en la *Tabla 3.4* se muestra una selección de posibles escenarios potenciales de riesgo con fugas de GLP (con la correspondiente frecuencia reportada en eventos/año), estos escenarios pueden conllevar a una pérdida de contención con ignición, con probabilidad de propagarse y generar consecuencias graves hasta desencadenar el ED.

Los escenarios se adecuaron a las características de las dos áreas de riesgo de la instalación en estudio que manejan GLP, sustancia peligrosa. En este caso de estudio no se considerarán las pérdidas de contención probables que puedan presentarse en las tuberías y bombas de trasiego de GLP.

Tabla 3.4. Escenarios de riesgo seleccionados para el caso de estudio

Unidad/AR	Escenario de riesgo probable	Frecuencia
Balas 1-4 de almacenamiento de GLP/AR I	1. Escape instantáneo de todo el contenido de una bala	$5 \cdot 10^{-7}$ años ⁻¹
	2. Escape continuo, a flujo constante, de todo el contenido, en 10 min.	$5 \cdot 10^{-7}$ años ⁻¹
	3. Escape continuo por un agujero de diámetro efectivo de 10 mm	$1 \cdot 10^{-5}$ años ⁻¹
Bala de recuperación No.5/AR I	4. Escape instantáneo de todo el contenido de la bala	$5 \cdot 10^{-7}$ años ⁻¹
	5. Escape continuo, a flujo constante, de todo el contenido, en 10 min.	$5 \cdot 10^{-7}$ años ⁻¹
	6. Escape continuo por un agujero de diámetro efectivo de 10 mm	$1 \cdot 10^{-5}$ años ⁻¹
Llenado-Pesaje/AR II	7. Incendio y explosión física de un cilindro lleno con 45 kg de GLP	$5 \cdot 10^{-6}$ años ⁻¹
Almacén de cilindros/ AR II	8. Incendio y explosión física de un cilindro lleno con 45 kg de GLP	$1 \cdot 10^{-5}$ años ⁻¹

Las principales fuentes de ignición, en los escenarios seleccionados, pudieran ser:

- ✓ Impacto directo de un rayo en una de las balas de almacenamiento de GLP.
- ✓ Impacto directo de un proyectil del compresor en una de las balas de almacenamiento de GLP.
- ✓ Incendio externo no controlado (*incendio de la vegetación abundante que rodea la instalación por la ignición de una descarga eléctrica cercana, por chispas eléctricas generadas por el mal estado en red, por error o negligencia de un operario, otras*).

3.3. Identificación y clasificación de las unidades creíbles de accidente mayor

Las unidades creíbles se identifican en correspondencia con las unidades seleccionadas para los escenarios de riesgo potencial de la *Tabla 3.4*, y se clasifican y ordenan por áreas de riesgo como sigue:

AR I: Se clasifican las unidades creíbles según el orden numérico de los escenarios del 1 al 6 (*Tabla 3.4*) considerando la peligrosidad descendiente en ese mismo orden.

AR II: De igual forma que el área anterior, se considera la mayor peligrosidad en el escenario No.7, en comparación con el No.8.

Las consecuencias probables en estas unidades creíbles de accidente mayor seleccionadas dependerán del tipo de fuga (escape instantáneo o continuo) y los correspondientes volúmenes de GLP que se escapan, así como del tiempo de la ignición (inmediata o retardada).

Teniendo en cuenta lo anterior, lo más probable es que se genere un dardo de fuego con un vector de intensificación de tipo radiación térmica, o una explosión BLEVE con vectores de sobrepresión y proyección de fragmentos y una bola de fuego con el vector de radiación térmica correspondiente.

3.4. Especificación de la unidad primaria

Unidad primaria: **Bala No.1** de 90 m³, se selecciona el escenario No.3 (*Tabla 3.4*) por su mayor frecuencia probable. Escape continuo por un agujero de diámetro efectivo de 10mm seguido de un **dardo de fuego con radiación térmica**.

3.5. Definición de los umbrales de intensificación

Tabla 3.5. Valores umbrales de intensificación seleccionados para el caso de estudio

Vectores de intensificación	Umbral	Categoría del equipo
Radiación térmica (kW/m ²)	40	Todos
Onda de choque o sobrepresión (kPa)	35	Todos
Proyección de fragmentos (m)	900	Todos

En la *Tabla 3.5* se muestran los valores umbrales de los vectores de intensificación que se utilizarán en este caso de estudio, la selección se basó en tomar los valores intermedios de la amplia lista de umbrales reportados y las recomendaciones del Capítulo II, *epígrafe 2.5*.

3.6. Análisis de frecuencia y consecuencias del accidente primario

3.6.1. Frecuencia de ocurrencia del accidente primario

La frecuencia de ocurrencia de accidente primario, escenario No.3, se toma de la propuesta de la *Tabla 3.4*:

Igual a $1 * 10^{-5}$ años⁻¹.

3.6.2. Cálculo de las consecuencias del accidente primario

Para determinar las consecuencias del accidente primario se utilizó el *software ALOHA 5.4.1*. A continuación se muestran los resultados obtenidos, en forma gráfica (*Figura 3.5*) y de texto de los datos de entrada y de los resultados de los cálculos.

RESULTADOS DEL ALOHA 5.4.1 (ACCIDENTE PRIMARIO)

SITE DATA:

Location: SANTA CLARA, CUBA
 Building Air Exchanges. Per Hour: 0.88 (unsheltered single storied)
 Time: October 14, 2015. 1200 hours ST (user specified)

CHEMICAL DATA:

Chemical Name: BUTANE
 Molecular Weight: 58.12 g/mol
 TEEL-1: 2400 ppm
 TEEL-2: 4000 ppm
 TEEL-3: 19000 ppm
 LEL: 15000 ppm
 UEL: 90000 ppm
 Ambient Boiling Point: -0.6°C
 Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm
 Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)

Wind: 4 meters/second from NNE at 3 meters
 Ground Roughness: urban or forest
 Cloud Cover: 5 tenths
 Air Temperature: 35°C
 Stability Class: D
 No Inversion Height
 Relative Humidity: 85%

SOURCE STRENGTH:

Leak from hole in horizontal cylindrical tank
 Flammable chemical is burning as it escapes from tank
 Tank Diameter: 2.68 meters
 Tank Length: 16 meters
 Tank Volume: 90 cubic meters
 Tank contains liquid
 Internal Temperature: 35°C
 Chemical Mass in Tank: 40,544 kilograms
 Tank is 80% full

Circular Opening Diameter: 1 centimeters
 Opening is 1.34 meters from tank bottom
 Max Flame Length: 6 meters
 Burn Duration: ALOHA limited the duration to 1 hour
 Max Burn Rate: 46.3 kilograms/min
 Total Amount Burned: 2,774 kilograms
 Note: The chemical escaped from the tank and burned as a jet fire.

THREAT ZONE:

Threat Modeled: Thermal radiation from jet fire
Red: 10 meters --- (10.0 kW/(sq m) = potentially lethal within 60 sec)
Orange: 12 meters --- (5.0 kW/(sq m) = 2nd degree burns within 60 sec)
Yellow: 18 meters --- (2.0 kW/(sq m) = pain within 60 sec)

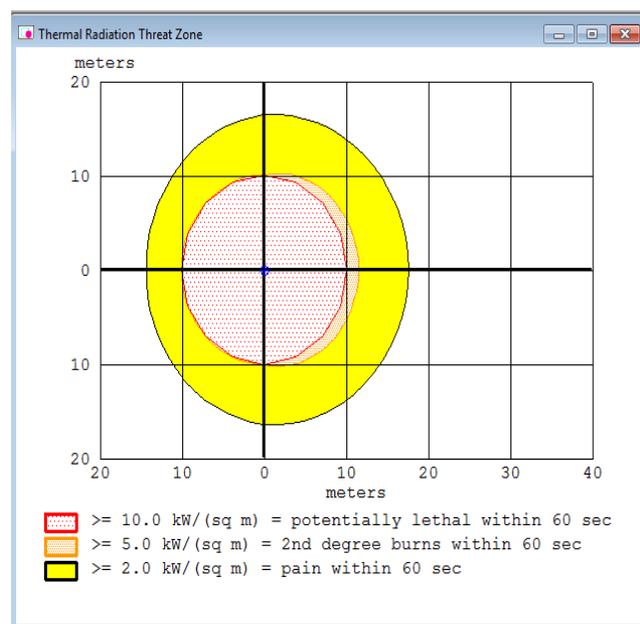


Figura 3.5. Radios de afectación del dardo de fuego, para los valores de intensidad de la radiación térmica con consecuencias para las personas.

En la gráfica de la *Figura 3.5*, se muestran las líneas iso-riesgo de consecuencias sobre las personas, con los posibles daños letales (rojo), quemaduras de 2^{do} grado (anaranjado) y molestias (amarillo) generadas por el vector de radiación térmica, efectos calculados para los valores umbrales que define el ALOHA para estas consecuencias probables.

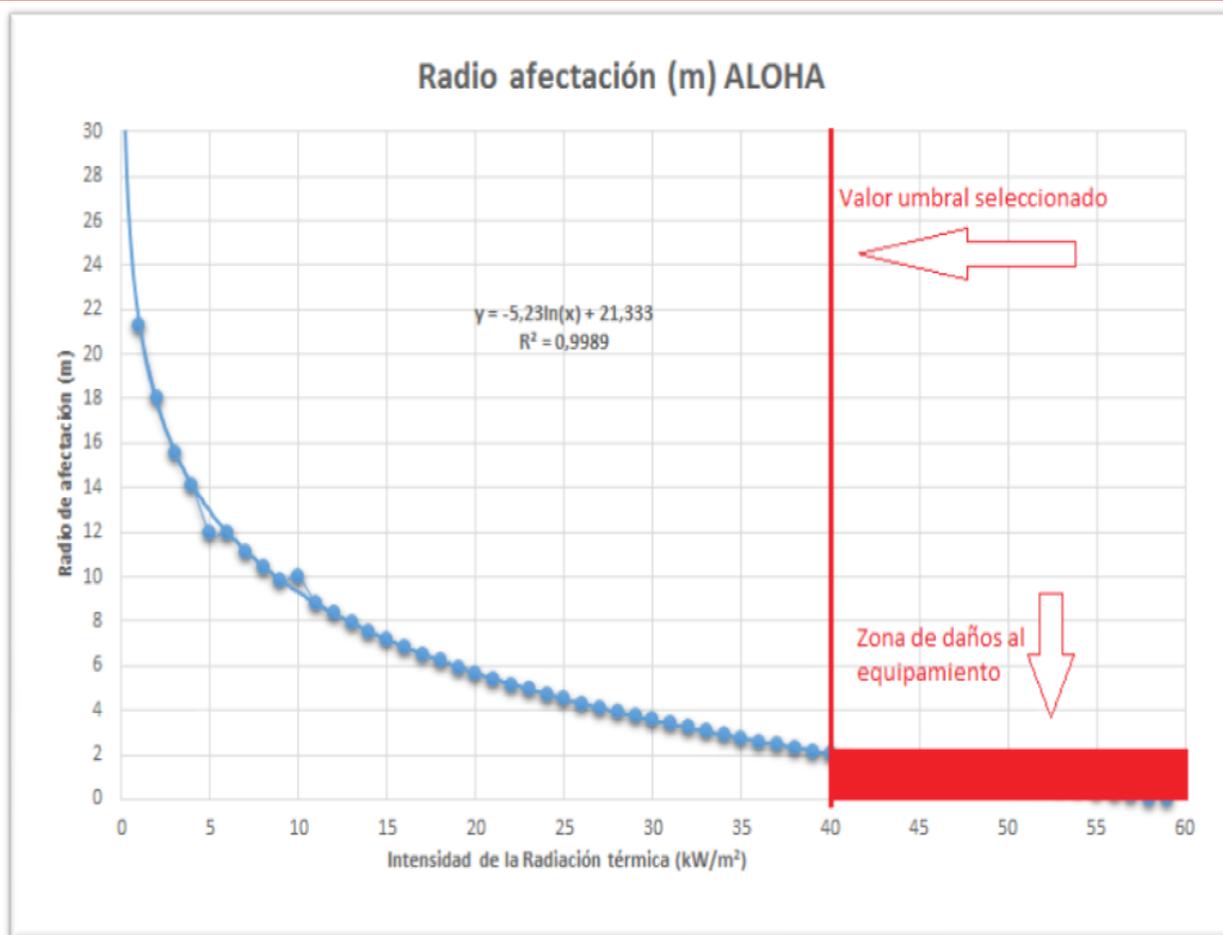


Figura 3.6. Curva ajustada de radios de afectación del vector de intensificación vs intensidad de la radiación térmica que se genera en el escenario No.3 del accidente primario

Como se observa en la gráfica (*Figura 3.6*) los valores de los radios de afectación y el valor umbral seleccionado (40 kW/m^2) permiten determinar la zona de daños probables (área sombreada), lo que significa en este caso que todo equipo que se localice a una distancia menor o igual a los dos (2) metros de la fuente de **dardo de fuego** resultará potencialmente afectado siempre que la radiación térmica supere el valor umbral.

3.7. Cálculo de los vectores de intensificación

En la *Figura 3.6* se representan los valores de intensidad de la **radiación térmica**, calculados por el *software* ALOHA 5.4.1 y ajustados puntualmente para cada coordenada (x, y) correspondiente a la ubicación en planta de las balas 2, 3 y 4 del **AR I**, consideradas unidades destino con afectaciones probables por el vector de intensificación del accidente primario. En este caso de estudio para el accidente primario fue considerado un solo vector de intensificación, radiación térmica, generada por el dardo de fuego en el escenario No.3.

En la *Tabla 3.6* se resumen los resultados puntuales obtenidos del vector de intensificación para cada distancia de afectación, desde el punto con las coordenadas (0,0) fuente de generación del dardo de fuego en la Bala No.1, hasta 18 metros de la fuente, límites del **AR I**.

Tabla 3.6. Valores de los vectores de intensificación calculados por ALOHA 5.4.1 (radiación térmica) para el dardo de fuego, escenario No.3

Radiación térmica I (kw/m ²)	Distancia de la afectación (m)
2	18
4	14
6	12,0
8	10,5
10	10
12	8,3
14	7,5
16	6,8
18	6,2
20	5,7
22	5,2
24	4,7
26	4,3
28	3,9
30	3,5
32	3,2
34	2,9
36	2,6
38	2,3
40	2,0
42	1,8
44	1,5
46	1,3
48	1,1
50	0,9
52	0,7
54	0,5
56	0,3
58	0

3.8. Comparación los vectores de intensificación con los valores umbrales

En la *Tabla 3.7* se comparan los valores de intensidad del vector de intensificación de radiación térmica del dardo de fuego con el valor umbral seleccionado (40 kW/m²), en función de la distribución en planta de las posibles unidades destino en el **AR I** del Almacén tecnológico (distancias entre las unidades destino y la fuente), asimismo en la *Figura 3.7*, se representan la unidad primaria (Bala No.1) y las unidades de destino probable de afectación por radiación del dardo de fuego (Balas 1-4), graficando además la línea del valor umbral. En ambos casos (*Tabla y Figura*) se demuestra que solo resulta afectada la Bala No.2, como unidad secundaria.

Tabla 3.7. Comparación de las magnitudes del vector de intensificación, en función de la distribución en Almacén tecnológico del área de riesgo AR I

Vector de intensificación	Intensidad (kW/m ²)	Unidades (Recipientes)	Distancia a la fuente (m)
Radiación térmica Resultado ALOHA 5.4.1	58,00	Bala No.1	0
	40,00	Bala No.2	2
	19,00	Bala No.3	6
	10,00	Bala No.4	10
	4,00	Bala No.5	14

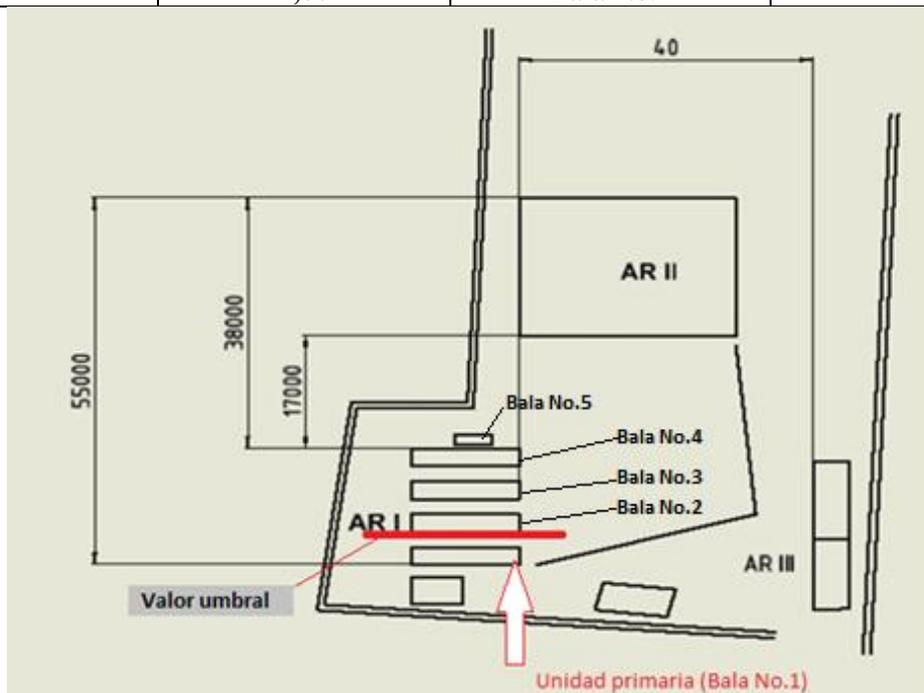


Figura 3.7. Representación de la zona de afectación en el caso de estudio

3.9. ¿Es posible la propagación?

Si es posible la propagación, como se puede observar en la *Figura 3.7*, resultará afectada la Bala No. 2 de GLP para el escenario seleccionado de accidente primario (escenario No.3), teniendo en cuenta el valor umbral de 40kW/m² de posible afectación para recipientes a presión.

3.10. Identificación de las unidades destino con potencial de intensificación

3.10.1. Unidades destino del accidente primario

Identificación de las unidades destino producto del accidente primario (Bala No.1): En un primer momento se valoraron todos los equipos presentes en el Almacén tecnológico para determinar su potencial de intensificación, en este caso de estudio para el escenario seleccionado (escenario No.3) sólo clasifica la **Bala No.2**, como se determinó en los epígrafes anteriores.

3.10.2. Unidades destino del accidente secundario

Intensificación de las unidades destino producto del accidente secundario (Bala No.2): Suponiendo que en el accidente secundario se genere el escenario No.1, evaluado da como resultado la intensificación del riesgo en

todas las áreas del Almacén tecnológico GLP, al superar los valores umbrales en todos los casos, es decir resultaran dañados todos los equipos e instalaciones del Almacén tecnológico.

3.11. Cálculo de los valores Probit en cada unidad destino

3.11.1. Unidades destino del accidente primario

Para determinar los valores Probit se utilizaron las ecuaciones *Ec. 1* y *Ec.2*.

$$\ln(\text{tff}) = -0.95 * \ln(I) + 8.845 * V^{0.032} \dots\dots\dots \text{Ec.1}$$

$$Y = 9.25 - 1.85 * \ln(\text{tff}/60) \dots\dots\dots \text{Ec.2}$$

Tabla 3.8. Resultados obtenidos para los valores Probit de los recipientes de la AR I, escenario No.3

Recipientes	V (m ³)	dup (m)	I(kw/m ²)	Y	Pr(%)	(tff, min)	def (min)
Bala No.1	90	0	58,00	9,06	100	8,94	≥60
Bala No.2	90	2	40,00	9,05	100	12,72	≥60
Bala No.3	90	6	19,00	9,02	100	25,81	≥60
Bala No.4	90	10	10,00	9,00	100	47,48	≥60
Bala No.5	2,2	14	4,00	9,01	100	36,42	≥60

donde: (V, m³) volumen promedio del recipiente; (dup, m) distancia a la unidad primaria; (I, kW/m²) intensidad de la radiación térmica producto del dardo de fuego; (Y) valor Probit; (Pr, %) probabilidad de afectación; (tff, min.) tiempo hasta el fallo; (def, min) duración del efecto del dardo de fuego, limitado por el ALOHA 5.4.1.

3.11.2. Unidades destino del accidente secundario

No es necesario calcular los valores Probit.

3.12. Clasificación relativa del riesgo de efecto dominó en cada unidad destino

3.12.1. Unidades destino del accidente primario

Tabla 3.9. Caracterización de los equipos destino para el accidente primario

Recipientes	Material del recipiente	Sustancia	V (m ³)	Estado de la sustancia	Pt (kg/cm ²)	Tt (°C)	dup (m)
Bala No.2	Acero	GLP	90	Líquido	12	35	2
Bala No.3	Acero	GLP	90	Líquido	12	35	6
Bala No.4	Acero	GLP	90	Líquido	12	35	10
Bala No.5	Acero	GLP	2,2	Líquido	12	35	14

donde: (V , m^3) volumen promedio del recipiente; (P_t , kg/cm^2) presión de trabajo; (T_t , $^{\circ}C$) temperatura de trabajo; dup (m) distancia a la unidad primaria.

Teniendo en cuenta la [Tabla 3.9](#) y según las recomendaciones del *epígrafe 2.12* del Capítulo II se hace la clasificación relativa del riesgo de ED, como se observa los datos son similares para las Balas No.2-4 (excepto las distancias a la unidad primaria) y la Bala No.5, con valores muy inferiores de volumen de sustancia peligrosa y con mayor distancia a la unidad primaria que el resto. Por los valores anteriores se puede crear un rango peligrosidad. No obstante, si tomamos en cuenta el valor umbral asumido ($40kW/m^2$), sólo clasifica como unidad destino del accidente primario la **Bala No.2**.

3.12.2. Unidades destino del accidente secundario

En este caso se evalúan el resto de los equipos e instalaciones del Almacén tecnológico GLP ([Tabla 3.10](#))

Tabla 3.10. Caracterización de las unidades destino para el accidente secundario

Unidad destino	Material	Sustancia	V (m^3)	Estado de la sustancia	Pt (kg/cm^2)	Tt ($^{\circ}C$)	dup (m)
Bala No.3	Acero	GLP	90	Líquido	12	35	2
Bala No.4	Acero	GLP	90	Líquido	12	35	6
Bala No.5	Acero	GLP	2,2	Líquido	12	35	10
AR II	Edificación						40
AR III	Edificación						40

Teniendo en cuenta las características de las unidades destino y según las recomendaciones del *epígrafe 2.12* del Capítulo II se hace la clasificación relativa del riesgo de ED, en este caso el valor de la sobrepresión en todas las unidades destino es muy superior al valor umbral asumido en el escenario No.1 (valor umbral 35 kPa), clasifican todas como unidades destino del accidente secundario. El orden de importancia se corresponde con la [Tabla 3.10](#).

3.13. Estimación de las probabilidades de daños en cada unidad destino

3.13.1. Unidades destino del accidente primario

Tomando como base las recomendaciones del *epígrafe 2.13* de la metodología, así como los resultados obtenidos del cálculo de los valores Probit en el *epígrafe 3.11*. Se pueden estimar los daños reales probables debido a la exposición a las cargas de calor del dardo de fuego, escenario No.3.

Como se observa en la [Tabla 3.8](#), todos los recipientes del **AR I** presentan probabilidad de 100% de afectación a diferentes niveles de daños, aunque si se considera la radiación umbral ($40kW/m^2$) asumida, sólo será dañada en un nivel significativo la **Bala No.2**, para el escenario No.3.

El valor de la duración del efecto del dardo de fuego es también muy superior, en todos los casos, al valor del tiempo estimado hasta el fallo, lo que significa la posibilidad real de fallo, siempre que sea superado el valor umbral seleccionado (**Bala No.2**). Además, en este caso los daños dependen de los datos de la *Tabla 3.9* referida a las características de los equipos destino.

3.13.2. Unidades destino del accidente secundario

Se asume el 100% de probabilidad de daño, teniendo en cuenta las magnitudes del evento evaluado. No se calcula el Valor Probit en el *epígrafe 3.11*.

3.14. Estimación del estado de daños e intensidad de pérdidas en cada unidad destino

3.14.1. Unidades destino del accidente primario

Tabla 3.11. Definición de las clases de intensidad de pérdida y categorías de estado de daño para las unidades destino

Recipientes	Tipo de recipiente	Evento primario	Escenario	Categoría de Estado de daño	Clase de Intensidad de pérdida
Bala No.2	Presurizado	Dardo de fuego	No.3	DS2	LI3
Bala No.3	Presurizado	Dardo de fuego	No.3	DS1	LI1
Bala No.4	Presurizado	Dardo de fuego	No.3	DS1	LI1
Bala No.5	Presurizado	Dardo de fuego	No.3	DS1	LI1

donde: **DS1**: Daño ligero a las estructuras o al equipamiento auxiliar; **DS2**: Daño intenso o catastrófico el cual sin duda alguna seguido por una intensa pérdida de contención. **LI1**: Pérdida menor, definida como la pérdida parcial del contenido del recipiente o la pérdida total del contenido en un intervalo de tiempo mayor de 10 minutos. **LI3**: Pérdida catastrófica, definida como la pérdida instantánea del contenido.

3.14.2. Definición de los escenarios probables de las unidades secundarias

Teniendo en cuenta la clasificación por clases de intensidad de pérdida y categorías de estado de daño para las unidades destino (*Tabla 3.11*), se define como el posible escenario de la unidad secundaria (Bala No.2) el **escape instantáneo del todo el contenido** (Escenario No.1, *Tabla 3.4*).

En este caso se supone que producto del calor que genera el dardo de fuego del accidente primario, en contacto directo sobre la **Bala No.2**, provoca que en esta se aumente significativamente la temperatura de la superficie del recipiente metálico y por consiguiente la presión en el interior de la bala, lo que conlleva a la apertura de la válvula de seguridad y/o la ruptura del disco de seguridad, lo que despresuriza el recipiente en presencia de la fuente de ignición (dardo de fuego), generando una explosión *BLEVE* y una bola de fuego.

3.14.3. Unidades destino del accidente secundario

Tabla 3.12. Clases de intensidad de pérdida y categorías de estado de daño para las unidades destino

Unidad destino	Tipo de recipiente	Evento secundario	Escenario	Categoría de Estado de daño	Clase de Intensidad de pérdida
Bala No.3	Presurizado	<i>BLEVE</i>	No.1	DS2	LI3
Bala No.4	Presurizado	<i>BLEVE</i>	No.1	DS2	LI3
Bala No.5	Presurizado	<i>BLEVE</i>	No.1	DS2	LI3
AR II	Edificación	<i>BLEVE</i>	No.1	DS2	LI3
AR III	Edificación	<i>BLEVE</i>	No.1	DS2	LI3

3.14.4. Definición de los probables escenarios de las unidades terciarias

Teniendo en cuenta la clasificación por clases de intensidad de pérdida y categorías de estado de daño para las unidades destino (*Tabla 3.12*), se define que el posible escenario para las unidades terciarias es la destrucción total de todos los equipos e instalaciones que las conforman. En este caso se supone que el vector de sobrepresión que genera la explosión *BLEVE* de la Bala No.2 alcanza valores muy superiores al valor umbral seleccionado para dichas unidades.

3.15. Identificación y cálculo de los vectores de intensificación en cada unidad destino

3.15.1. Unidades destino del accidente primario

Identificación de los vectores de intensificación: En el caso del fenómeno BLEVE se generan tres posibles vectores de intensificación: Radiación térmica de la bola de fuego; Onda de choque o sobrepresión generada por la explosión y Proyección de fragmentos del material del cuerpo de la bala.

Cálculo de los efectos de la radiación térmica producida por la bola de fuego

Frecuencia de ocurrencia del accidente secundario: **Escenario No.1; (*Tabla 3.4*): $5 \cdot 10^{-7}$ años⁻¹.**

Para determinar las **consecuencias** del accidente secundario (Escenario No.1), al igual que para el primario, se utilizó el *software ALOHA 5.4.1*.

RESULTADOS DEL ALOHA 5.4.1 (ACCIDENTE SECUNDARIO)

SITE DATA:

Location: SANTA CLARA, CUBA

Building Air Exchanges. Per Hour: 0.88 (unsheltered single storied)

Time: October 14, 2012. 12:00 hours ST (user specified)

CHEMICAL DATA:

Chemical Name: BUTANE

Molecular Weight: 58.12 g/mol

TEEL-1: 2400 ppm

TEEL-2: 4000 ppm

TEEL-3: 19000 ppm

LEL: 15000 ppm

UEL: 90000 ppm

Ambient Boiling Point: -0.6°C

Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm.

Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)

Wind: 4 meters/second from NNE at 3 meters

Ground Roughness: urban or forest

Cloud Cover: 5 tenths

Air Temperature: 35°C

Stability Class: D

No Inversion Height

Relative Humidity: 85%

SOURCE STRENGTH:

BLEVE of flammable liquid in horizontal cylindrical tank

Tank Diameter: 2.68 meters

Tank Length: 16 meters

Tank Volume: 90 cubic meters

Tank contains liquid

Internal Storage Temperature: 35°C

Chemical Mass in Tank: 40,544 kilograms

Tank is 80% full

Percentage of Tank Mass in Fireball: 100.0%

Fireball Diameter: 199 meters

Burn Duration: 13 seconds

THREAT ZONE:

Threat Modeled: Thermal radiation from fireball

Red: 417 meters --- (10.0 kW/(sq m) = potentially lethal within 60 sec)

Orange: 589 meters --- (5.0 kW/(sq m) = 2nd degree burns within 60 sec)

Yellow: 916 meters --- (2.0 kW/(sq m) = pain within 60 sec)

60 sec)

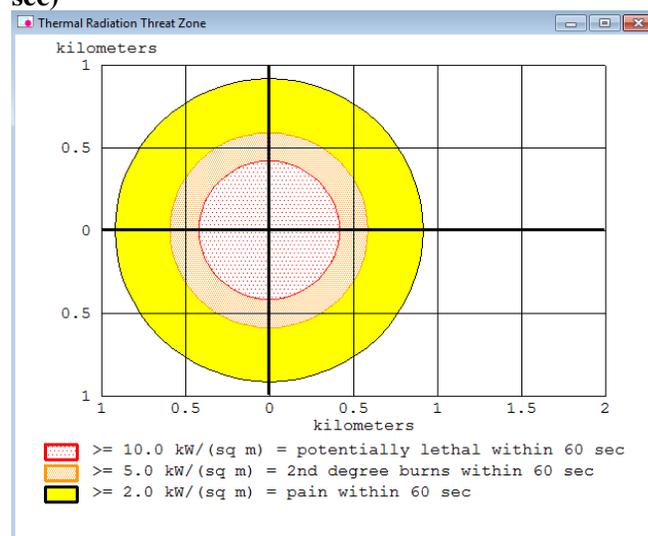


Figura 3.8. Radios de afectación de la bola de fuego, para los valores de intensidad de la radiación térmica con consecuencias para las personas

En la gráfica de la *Figura 3.8*, se muestran las líneas iso-riesgo de consecuencias sobre las personas, con los posibles daños letales (rojo), quemaduras de 2^{do} grado (anaranjado) y molestias (amarillo) generadas por el vector de radiación térmica, efectos calculados para los valores umbrales que define el ALOHA para estas consecuencias probables.

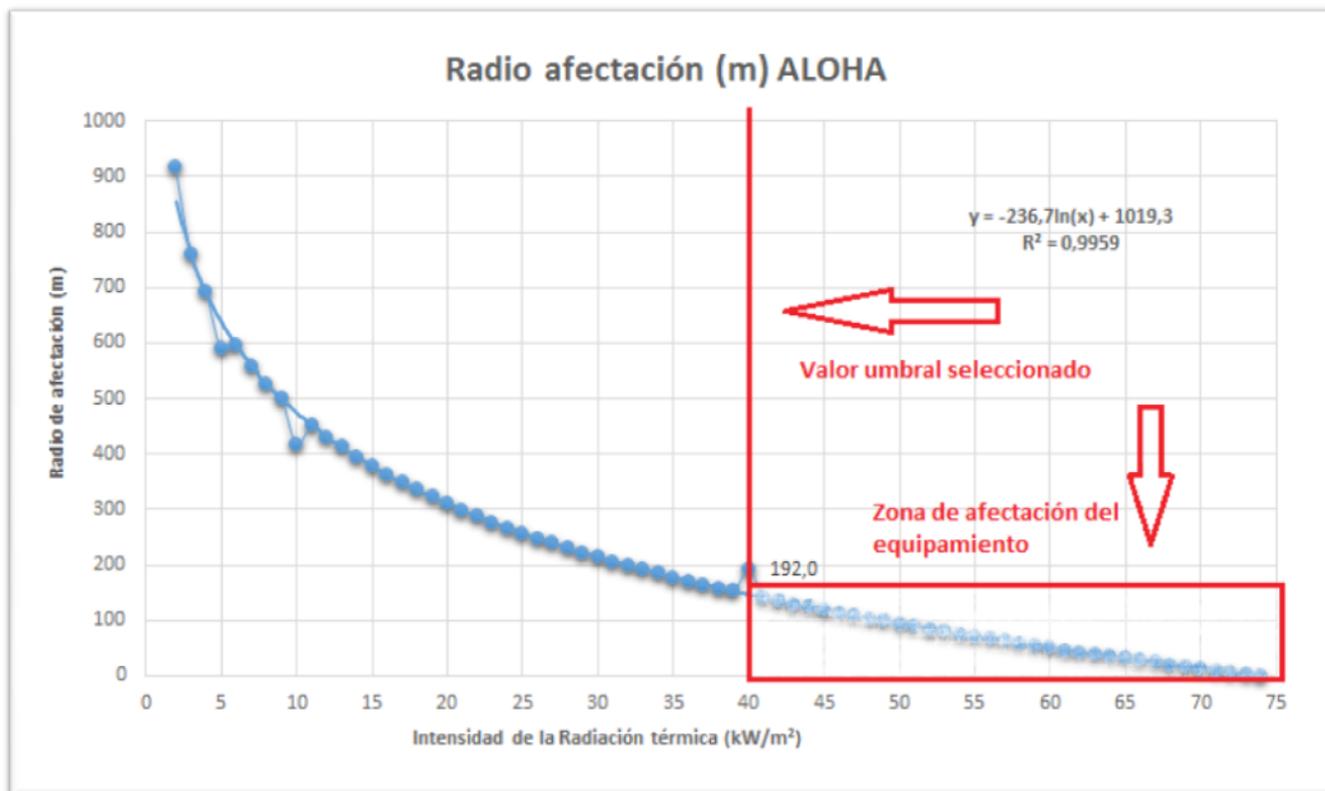


Figura 3.9. Curva ajustada de radios de afectación del vector de intensificación vs intensidad de la radiación térmica que se genera en el escenario No.1 del accidente secundario

Como se observa en la gráfica (*Figura 3.9*) los valores de los radios de afectación y el valor umbral seleccionado (40 kW/m²) permiten determinar la zona de daños probables (área encuadrada), lo que significa en este caso que todo equipo que se localice a una distancia menor o igual a 192 metros de la fuente de bola de fuego (por la explosión BLEVE) resultará potencialmente afectado siempre que la radiación térmica supere el valor umbral y el tiempo hasta el fallo sea menor o igual que el tiempo real de exposición.

Cálculo de los efectos de la sobrepresión generada por explosión (onda de choque)

Frecuencia de ocurrencia del accidente secundario: **Escenario No.1;** (*Tabla 3.4*): $5 * 10^{-7}$ años⁻¹.

En este caso se utilizó el **Método del TNT equivalente** para determinar la **sobrepresión** generada por la explosión *BLEVE*.

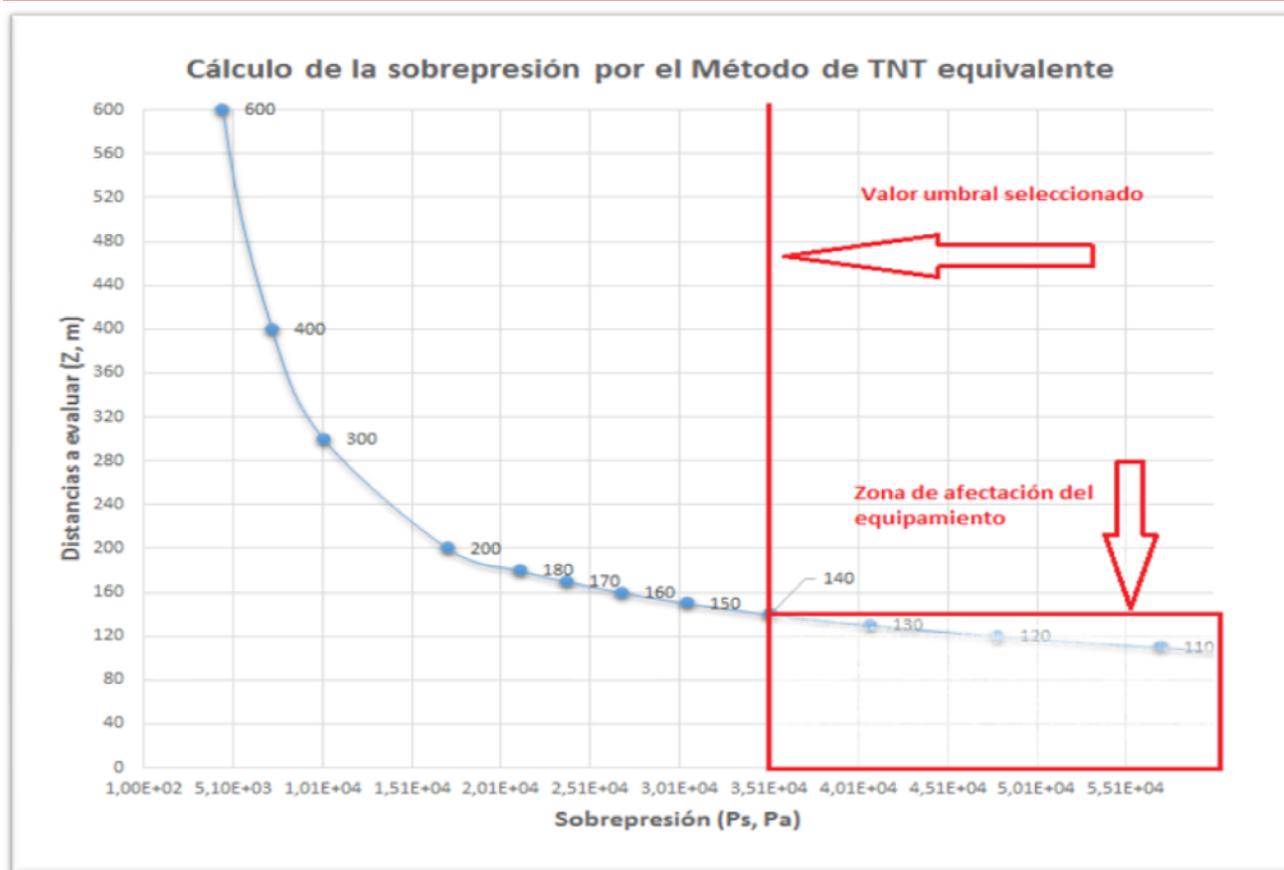


Figura 3.10. Curva ajustada de las distancias evaluadas para el vector de intensificación vs la sobrepresión que se genera por explosión BLEVE en el escenario No.1 del accidente secundario

Como se observa en la gráfica (*Figura 3.10*) los valores de la distancia de afectación y el valor umbral seleccionado (35kPa) permiten determinar la zona de daños probables (área encuadrada), lo que significa en este caso que todo equipo que se localice a una distancia menor o igual a 140 metros de la fuente de explosión BLEVE resultará potencialmente afectado siempre que la sobrepresión supere el valor umbral. El tiempo hasta el fallo no es considerado porque la explosión tendría efectos instantáneos.

En la *Tabla 3.14* se presenta un resumen de valores calculados de los vectores de intensificación (sobrepresión) e impulso mecánico, según el Método de TNT equivalente para la explosión BLEVE, escenario No.1.

3.15.2. Unidades destino del accidente secundario

Identificación de los vectores de intensificación

Producto de la sobrepresión se destruyen todos los equipos e instalaciones de las unidades terciarias, lo que potencialmente genera nuevos vectores de intensificación, relacionados a estos nuevos escenarios.

Cálculo de los efectos de los vectores de intensificación

En este caso, al considerar que la instalación se destruyó en su totalidad no se evalúan estos nuevos vectores. Pudieran considerarse en estudios posteriores para evaluar el efecto en las zonas aledañas (efecto dominó externo).

3.16. Cálculo de consecuencias de los vectores de intensificación en cada unidad destino

3.16.1. Unidades destino del accidente primario

A. Consecuencias para el vector de intensificación radiación térmica generada por la bola de fuego del BLEVE.

Tabla 3.13. Valores de los vectores de intensificación calculados por ALOHA (radiación térmica) para la bola de fuego del BLEVE, escenario No.1

<i>Radiación térmica I (kw/m²)</i>	<i>Distancia de la afectación (m)</i>
2	916
10	417
18	335,1
26	248,1
34	184,6
40	192,0
42	134,6
46	113,1
50	93,3
54	75,1
58	58,2
62	42,4
66	27,6
70	13,7
74	0,5
74,15	0,0

B. Consecuencias para el vector de intensificación sobrepresión generada por la explosión BLEVE

*Tabla 3.14. Resumen de valores de los vectores de intensificación (sobrepresión) e impulso mecánico calculados por el Método de TNT equivalente para la explosión BLEVE, escenario No.1.**

<i>Sobrepresión(Pa)</i>	<i>Impulso mecánico(i, Pa.s)</i>	<i>Distancia de la afectación (m)</i>
1,12E+06	5038,26	25
2,78E+05	2681,29	50
6,91E+04	1426,94	100
5,71E+04	1308,39	110
4,79E+04	1208,79	120
4,08E+04	1123,87	130
3,51E+04	1050,58	140
3,06E+04	986,65	150
2,69E+04	930,37	160
2,38E+04	880,44	170
2,12E+04	835,81	180
1,72E+04	759,40	200

* El Valor del TNT equivalente tomado para el GLP es igual **0,42**.

C. Consecuencias para el vector de intensificación proyección de fragmentos del material del cuerpo de la bala

En este caso de estudio no se calcularan las consecuencias de este vector de intensificación (fragmentos), por considerarlo innecesario teniendo en cuenta las magnitudes calculadas para la sobrepresión e impulso (*Tabla 3.14*), suficientes para suponer niveles catastróficos en este escenario No.1.

3.16.2. Unidades destino del accidente secundario

Se generan consecuencias catastróficas, pero no se evalúan para este caso de estudio.

3.17. ¿Es posible un nivel de intensificación superior?

3.17.1. Unidades destino del accidente secundario

- En el caso del vector **radiación térmica** provocado por la bola de fuego de la explosión BLEVE **no es posible un nivel superior de intensificación**, porque aunque se supera el valor umbral y la probabilidad de afectación a partir de los valores Probit de un 100%, el tiempo de afectación real por este fenómeno (duración de la bola de fuego) es muy inferior al tiempo hasta el fallo, según se puede observar en la *Tabla 3.15*.

Tabla 3.15. Resultados obtenidos para los valores Probit de los recipientes de la ARI, escenario No.1

Recipientes	V (m ³)	dus (m)	I (kW/m ²)	Y	Pr (%)	(tff, min.)	def (min.)
Bala No.2	90	0	74,15	9,04	100	13,63	0,22
Bala No.3	90	2	73,50	9,04	100	13,78	0,22
Bala No.4	90	6	72,30	9,04	100	14,08	0,22
Bala No.5	2,2	10	71,00	9,08	100	4,67	0,22

donde: (V, m³) volumen promedio del recipiente; (dus, m) distancia a la unidad secundaria; (I, kW/m²) intensidad de la radiación térmica producto de la bola de fuego; (Y) valor Probit; (Pr, %) probabilidad de afectación; (tff, min.) tiempo hasta el fallo; (def, min.) duración del efecto de la bola de fuego, según el ALOHA 5.4.1.

En este caso para determinar los valores Probit se utilizó la ecuación *Ec.2* (al igual que en el escenario No.3) y para el valor del tiempo hasta el fallo se utiliza la ecuación *Ec.3*, teniendo en cuenta que para el escenario No.1 los equipos estarían envueltos en llama.

$$\ln(\text{tff}) = -1.29 * \ln(I) + 10.971 * V^{0.026} \dots\dots\dots \text{Ec.3}$$

- En el caso del vector de **sobrepresión** generado por la explosión BLEVE **si es posible un nivel superior de intensificación**, porque se supera ampliamente el valor umbral. En este caso no es necesario calcular los valores Probit para la probabilidad de afectación, ni el tiempo hasta el fallo por las magnitudes de los daños y la instantaneidad del fenómeno de explosión. Teniendo en cuenta este resultado es necesario identificar los

equipos destino con potencial de intensificación (*epígrafe 3.10*). La evaluación de los daños que pueden provocar las unidades terciarias deben considerarse en **estudios posteriores** como efecto dominó externo.

3.18. ¿Se analizaron todos los eventos primarios?

Si, fueron analizados todos los eventos clasificados como primarios

3.19. Cálculo de la frecuencia y consecuencias totales

3.19.1. Cálculo de la frecuencia

Para el cálculo de la probabilidad del **efecto dominó** en el Almacén tecnológico de GLP (caso de estudio) se asumen las siguientes consideraciones:

- ✓ El dardo de fuego es el accidente primario más probable,
- ✓ El accidente primario es más probable que se genere en el **AR I**,
- ✓ En el **AR I**, las cuatro balas de almacenamiento (90 m³), tienen igual probabilidad de fallo ($1 \cdot 10^{-5}$ años⁻¹),
- ✓ La explosión **BLEVE** es el accidente secundario más probable, ($5 \cdot 10^{-7}$ años⁻¹),
- ✓ El accidente secundario es más probable que se genere en el **AR I**.

La frecuencia falla por efecto dominó (**Ff(ED)**) se estima por la ecuación **Ec.4**.

$$\mathbf{Ff(ED)} = \mathbf{Prob}_{\text{intensificación}} + \mathbf{f}_{\text{primaria}} \dots \dots \dots \mathbf{Ec.4}$$

Donde: $\mathbf{f}_{\text{primaria}}$ (evento/año), frecuencia de ocurrencia del evento primario; $\mathbf{Prob}_{\text{intensificación}}$ (evento/año), probabilidad de intensificación del vector del accidente primario.

El valor de $\mathbf{f}_{\text{primaria}}$ puede ser calculado usando los métodos convencionales, en este **caso de estudio**, como se dijo, se asume un valor ($1 \cdot 10^{-5}$ años⁻¹).

Determinar $\mathbf{Prob}_{\text{intensificación}}$ representa un gran problema porque puede fallar un equipo o varios equipos vecinos y todos ellos pueden influir en la probabilidad de falla de la unidad destino. Por lo que en este caso de estudio, para estimar la probabilidad de intensificación del vector del accidente primario para cuatro eventos probables (dardo de fuego desde cualquiera de las cuatro balas) se desarrolla la ecuación **Ec.6** para todas las combinaciones probables para los cuatro eventos.

$$\mathbf{P(B1 \cup B2 \cup B3 \cup B4)} = \mathbf{P(B1) + P(B2) + P(B3) + P(B4) - P(B1 \cap B2) - P(B1 \cap B3) - P(B1 \cap B4) - P(B2 \cap B3) - P(B2 \cap B4) - P(B3 \cap B4) + P(B1 \cap B2 \cap B3) + P(B2 \cap B3 \cap B4) + P(B1 \cap B3 \cap B4) + P(B1 \cap B2 \cap B4) - P(B1 \cap B2 \cap B3 \cap B4)}$$

.....**Ec.6**

Donde: **B1; B2; B3; B4**- son las cuatro balas de GLP; **P**- es la probabilidad de fallo, (evento/año);

U –significa la unión y se suman los valores. **∩** –significa intersección y se multiplican los valores.

Entonces:

$Prob_{intensificación} = Ec.6$

$Prob_{intensificación} = 4.00E-05 \text{ años}^{-1}$

$Ff_{(ED)} = 4.00E-05 + 1.00E-05 = 5.00E-05 \text{ años}^{-1}$

El escenario No.1 que puede generar el accidente de explosión BLEVE en un equipo individual tendría una frecuencia de $5.00E-07 \text{ años}^{-1}$, mientras que en este caso de estudio, donde el BLEVE es el evento secundario del efecto dominó, la frecuencia probable se incrementa en $4.95E-05$.

3.19.2. Cálculo de las consecuencias totales

El efecto dominó, en este caso de estudio, se evaluó considerando la siguiente cadena de eventos (Figura 3.11):

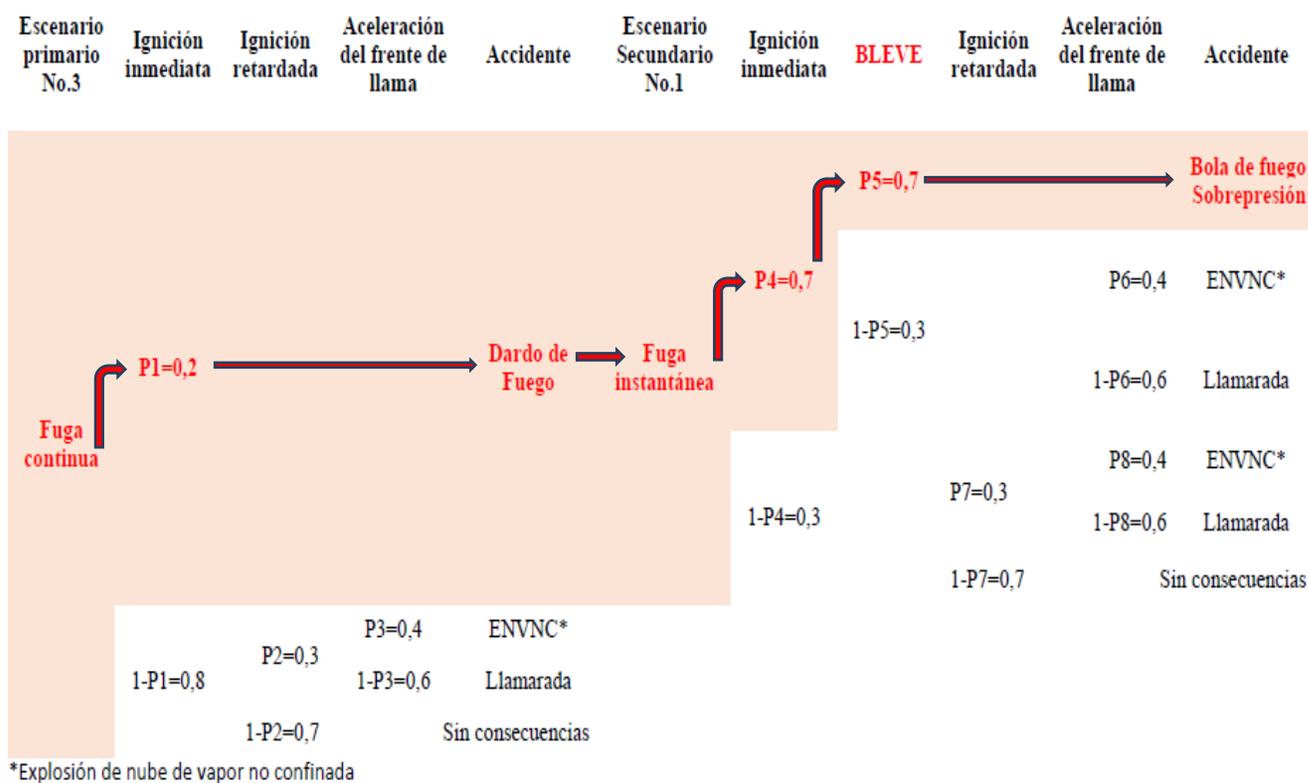


Figura 3.11. Eventos del efecto dominó para el caso de estudio, la cadena de eventos evaluados (más probables) se representan unidos consecutivamente con flechas

Accidente primario: en la Bala No.1, consistente en un escenario de escape continuo por un agujero de diámetro efectivo de 10 mm (escenario No.3), con una frecuencia probable de $1 \cdot 10^{-5} \text{ años}^{-1}$, provocando un dardo de fuego en presencia de una fuente de ignición.

Accidente secundario: Producto del calor que genera el dardo de fuego del accidente primario, en contacto directo sobre la Bala No.2, provoca que en esta unidad se aumente significativamente la temperatura de la superficie del recipiente metálico y por consiguiente la presión en el interior de la bala, lo que conlleva a la apertura de la válvula de seguridad y/o la ruptura del disco de seguridad, y se despresuriza el recipiente en

presencia de la fuente de ignición (dardo de fuego), generando una explosión *BLEVE* y una bola de fuego, lo que se considera el accidente secundario. Frecuencia probable de $5 \cdot 10^{-7}$ años⁻¹.

Accidente terciario: A partir del vector de sobrepresión que genera la explosión *BLEVE* de la Bala No.2 para dichas unidades. Por lo que se puede considerar que las instalaciones y el equipamiento del Almacén tecnológico se destruyen en su totalidad.

Otros niveles: Es posible niveles superiores de intensificación, a considerarse en estudios posteriores como efecto dominó externo con posibles afectaciones graves a las zonas aledañas al Almacén tecnológico GLP.

Tabla 3.16. Resumen de los resultados del análisis de consecuencias del efecto dominó

Escenarios probables		Radiación térmica (kW/m ²)	Sobrepresión (Pa)	Fragmentos(*)	Unidad destino	Distancia a la fuente (m)
Escenario No.3 (Primario)	Dardo de fuego en la Bala No.1	40,00			Bala No.2	2
		19,00			Bala No.3	6
		10,00			Bala No.4	10
		4,00			Bala No.5	14
Escenario No.1 (Secundario)	BLEVE (Bola de fuego y onda de choque) en la Bala No.2	73,5	1,12E+06		Bala No.3	2
		72	1,12E+06		Bala No.4	6
		71	1,12E+06		Bala No.5	10
		62	4,36E+05		AR II	40
		62	4,36E+05		AR III	40

(*)La proyección de fragmentos, aunque hay probabilidades de generarse, en este caso de estudio no fueron evaluados.

En la *Tabla 3.16* se resumen las consecuencias totales del efecto dominó evaluado para el caso de estudio, como se puede observar, por el vector de intensificación **radiación térmica** sólo se afecta de gravedad, como unidad destino del accidente primario (dardo de fuego), la Bala No.2, donde se supera el valor umbral (40 kW/m²). Sin embargo, como resultado de **sobrepresión** del accidente secundario (explosión *BLEVE*) resultarían destruidos todos los equipos e instalaciones al superarse ampliamente el valor umbral (3,50E+04Pa).

La radiación térmica de la **bola de fuego** (explosión *BLEVE*) por sí sola no generaría daños significativos, pues el tiempo real de afectación no supera el tiempo hasta el fallo de las unidades destino, aunque dentro del fenómeno del *BLEVE* es un efecto destructivo adicional de la explosión.

3.20. Representación gráfica de los perfiles de riesgo

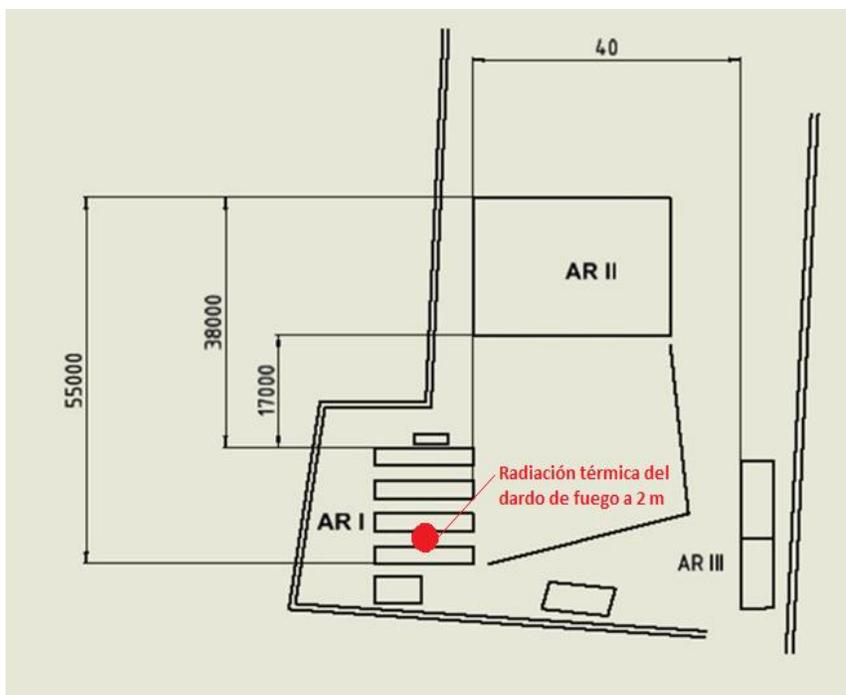


Figura 3.12. Perfil de riesgo del evento primario dardo de fuego, se representa el radio de afectación de la radiación térmica para el valor umbral (40 kW/m^2)



Figura 3.13. Perfil de riesgo del efecto dominó, se representa la afectación para los umbrales correspondientes de radiación térmica de las bolas de fuego y la sobrepresión generadas por la explosión BLEVE

Conclusiones parciales

Los análisis de resultados realizados en este Capítulo, se pueden resumir en dos conclusiones parciales de carácter general, así queda que:

1. La adición de nuevos procedimientos al QRA convencional posibilita la **simplificación de este análisis** tradicionalmente complejo y la inclusión del efecto dominó, partiendo de premisas técnicamente razonables y dentro un tiempo de estudio de riesgo relativamente corto, sin que se tenga que hacer una evaluación diferente o independiente para las unidades destino de una probable cadena de eventos graves.
2. La estructura metodológica propuesta permite un **flujo adecuado para la evaluación** integral cuantitativa del riesgo de accidente mayor, considerando la intensificación de los daños por efecto dominó, lo que ha sido validado por los resultados, satisfactorios y creíbles, obtenidos en su aplicación al Almacén Tecnológico de Gas Licuado del Petróleo (GLP) de Santa Clara, tomado como caso de estudio.



Conclusiones

CONCLUSIONES

A partir de los resultados de este trabajo se puede concluir que:

1. La metodología propuesta logra que el riesgo del ED sea cuantitativamente analizado dentro de las fronteras de un *QRA* convencional, sin afectar significativamente la forma y el tiempo en que estos análisis se realizan, y garantiza la identificación de las partes más vulnerables del sistema, facilitando la implementación de medidas de seguridad adecuadas en las instalaciones químicas.
2. La flexibilidad de metodología permite aplicar varias técnicas del *QRA* tradicional para la evaluación integral ED en todos los escenarios probables de accidente mayor de la industria química.
3. La aplicación de la metodología al “Almacén Tecnológico de Gas Licuado del Petróleo (GLP), Santa Clara”, permitió validar la funcionalidad y adecuación de cada uno de los procedimientos metodológicos propuestos, y evaluar la intensificación del riesgo por el ED en una instalación de peligro mayor.



Recomendaciones

RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta de los resultados y conclusiones de este trabajo, recomendamos:

1. Utilizar los métodos y procedimientos propuestos, como guía para el QRA incluyendo el ED en instalaciones con peligro mayor. Considerando, lógicamente, las adecuaciones correspondientes a cada caso de estudio.
2. Que los investigadores involucrados en estudios de riesgos en instalaciones de peligro mayor, valoren y utilicen los resultados obtenidos en la aplicación práctica de esta metodología, como *ejemplo* que les facilite la evaluación integral de casos reales de estudio.
3. Que los resultados obtenidos en el **estudio de caso** sean valorados y utilizados, por la dirección técnica de la Empresa Comercializadora de Combustibles de Villa Clara, en la toma de decisiones futuras, sobre todo en aquellos aspectos relacionados con la mejoría de la seguridad tecnológica de dicha instalación.



Bibliografía

BIBLIOGRAFÍA

1. Abbasi Tasneem, Pasmamb H.J., Abbai S.A A scheme for the classification of explosions in the chemical process industry. *Journal of Hazardous Materials* 174, 2010, pp. 270–280.
2. Abdolhamidzadeh B., Rashtchian D., Morshedi M. (a) Statistical survey of domino past accidents, 2009, 8th world congress of chemical engineering, Montreal 317.
3. Abdolhamidzadeh Bahman, Rashtchi Davood, Ashuri, Elham. A New Methodology for Frequency Estimation of Second or Higher Level Domino Accidents in Chemical and Petrochemical Plants Using Monte Carlo Simulation. *Iran. J. Chem. Chem. Eng.* Vol. 28, No. 4, 2009, pp. 21-28.
4. Abdolhamidzadeh Bahman, Abbasi Tasneem, Rashtchian, D., Abbasi S.A. A new method for assessing domino effect in chemical process industry. *Journal of Hazardous Materials*, Volume 182, Issues 1–3, 15 October 2010, pp. 416-426.
5. Abdolhamidzadeh Bahman, Abbasi, Tasneem, Rashtchian D., Abbai S.A. Domino effect in process-industry accidents – An inventory of past events and identification of some patterns. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Volume 24, Issue 5, September 2011, pp. 575-593.
6. Acikalin Aydan. Integration of safety management effectiveness into QRA calculations. *Process Safety Progress*, Volume 28, Issue 4, December 2009, pp. 331–337.
7. Ahmadpour Leila, Heidarinezhad Mohsen. Presenting a new approach for domino effect modeling based on occurrence scenarios in supply chain management. *Report and Opinion* 2014; 6(3) <http://www.sciencepub.net/report>, pp. 41 – 44.
8. Ahmed Mébarki, Jerez Sandra, Matasic Igor, Prodhomme Gaëtan, Reimeringer Mathieu. Explosions and Structural Fragments as Industrial Hazard: Domino Effect and Risks. *Procedia Engineering*, Volume 45, 2012, pp. 159-166.
9. Alileche N, Cozzani V, Reniers G, Estel L. Thresholds for Domino effects and safety distances in the process industry: are view of approaches and regulations. *Reliability Engineering and System Safety* 143, 2015, pp. 74–84.
10. Alileche Nassim. Cozzani Valerio, Reniers Genserik, Lionel Estel. Thresholds for domino effects and safety distances in the process industry: A review of approaches and regulations. *Reliability Engineering and System Safety* 143. 2015. pp.74–84.
11. ALOHA 5.4.1. The CAMEO® Software System .U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY Office of Emergency Management Washington, D.C. Office of Response and Restoration Emergency Response Division Seattle, Washington. 2007.

12. Antonioni, G., Spadoni, G. & Cozzani, V. Application of domino effect quantitative risk assessment to an extended industrial area. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 22. 2009, pp.614-624.
13. Arunraj N.S., Saptarshi Mandal, J. Maiti. Modeling uncertainty in risk assessment: An integrated approach with fuzzy set theory and Monte Carlo simulation *Accident Analysis and Prevention* 55. 2013. pp. 242– 255.
14. Avila S.F., Pessoa, F.L.P. Andrade J.C.S. Social HAZOP at an Oil Refinery. *Process Safety Progress*. Vol.32, No.1, 2013, pp. 17 – 21.
15. Baesi Shahabaldin, Bahman Abdolhamidzadeh, Che Rosmani Che Hassan, Mahar Diana Hamid a, Genserik Renier. Application of a multi-plant QRA: A case study investigating the risk impact of the construction of a new plant on an existing chemical plant's risk levels. *Reliability Engineering and System Safety*. 26, 2013, pp. 895 – 903.
16. Baker, W.E., Cox, P.A., Westine, P.S., Kulesz, J.J. & Strehlow, R.A. *Explosion Hazards and Evaluation*, Elsevier, 1983, Amsterdam.
17. Barclay L.M., Hutton J.L. Smith J.Q. Refining a Bayesian Network using a Chain Event. Graph. *International Journal of Approximate Reasoning* 54, 2013, pp. 1300–1309.
18. Barton, R.F. Fuel gas explosion guidelines – practical application. In: *Proc. IChemE Symposium Series No.139*. IChemE, Rugby, 1995, pp. 285–286.
19. Baybutt Paul (a). A critique of the hazard and operability (hazop) study. *Journal of loss prevention in the process industries*. Volume 33, January 2015, pp. 52–58.
20. Baybutt Paul. Competency requirements for process hazard analysis (PHA) teams. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 33. 2015. pp. 151-158.
21. Bernechea Esteban J., Vilches J. A., Arnaldos Josep. A model for estimating the impact of the domino effect on accident frequencies in quantitative risk assessments of storage facilities. *Process Safety and Environmental Protection*, In Press. 91. 2013. pp. 423-437.
22. Bobbio, A., Portinale, L., Minichino, M. & Ciancamerla, E. Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks. *Reliability Engineering and System Safety* 71, 2001, pp. 249–260.
23. Carol S., J.A. Vilchez, J. Casal, Study of the severity of industrial accidents with hazardous substances by historical analysis, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 15, 2002, pp.517– 524.
24. CCPS- Center for Chemical Process Safety. *Guidelines for Hazard Evaluation Procedures. Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis* AIChE-American Institute of Chemical Engineers, New York, 1989.

25. CCPS- Center for Chemical Process Safety. Guidelines for Hazard Evaluation Procedures Second Edition with Worked Examples. AIChE-American Institute of Chemical Engineers, New York, 1992.
26. CCPS, Center for Chemical Process Safety. Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases. AIChE, New York. 1999.
27. Chen Yinting, Zhang Mingguang, Guo Peijie, Jiang Juncheng. Investigation and Analysis of Historical Domino Effects Statistic. 2012 International Symposium on Safety Science and Technology. Procedia Engineering, Volume 45, 2012, pp. 152-158.
28. Cheng Lv, Ziyang Zhang, Xiang Ren, Shaojun Li. Predicting the frequency of abnormal events in chemical process with Bayesian theory and vine copula. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. Volume 32, November 2014, pp. 192–200.
29. Clini F., Darbra R. M., Casal J. Historical Analysis of Accidents Involving Domino Effect. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 182, 2010, pp. 390–401.
30. Commission of the European Communities. Directive 96/82/EC on the control of major accident hazards involving dangerous substances. The Official Journal of the European Communities, No L 10, 1997, pp. 13-33.
31. Consalvi J.L., Liu F. Radiative heat transfer in the core of axisymmetric pool fires – I: Evaluation of approximate radiative property models. International Journal of Thermal Sciences, Volume 84, October 2014, pp. 104-117.
32. Cozzani V., Salzano E. (a). The quantitative assessment of domino effects caused by overpressure part I. probit models. Journal of Hazardous Materials. Volume 107, Issue 3, 19 March, 2004, pp. 67–80.
33. Cozzani, V., Salzano, E. (b). The quantitative assessment of domino effects caused by overpressure. Part II: Case studies. Journal of Hazardous Materials 107. 2004, pp. 81–94.
34. Cozzani, V., Salzano, E. (c). Threshold values for domino effects caused by blast wave interaction with process equipment. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 17. 2004. 437–447.
35. Cozzani, V., Gubinelli, G., Antonioni, G., Spadoni, G., Zanelli, S. The assessment of risk caused by domino effect in quantitative area risk analysis. Journal of Hazardous Materials A127, 2005, pp. 14–30.
36. Cozzani V., Gianfilippo Gubinelli, Salzano Ernesto. Escalation thresholds in the assessment of domino accidental events. Journal of Hazardous Materials Volumen 129, Issues 1 - 3, 28-de febrero. 2006, pp. 1-21.
37. Cozzani V., A. Tugnoli, E. Slazano, The development of an inherent safety approach to the prevention of domino effects, Accident Analysis and Prevention 41 2009, pp. 1216–1227.

38. Cozzani Valerio, Antonioni Giacomo, Landucci Gabriele, Tugnoli Alessandro, Bonvicini Sarah, Spadoni Gigliola. Quantitative assessment of domino and NaTech scenarios in complex industrial areas. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 28. 2014. pp.10-22.
39. Darbra R.M., Casal J., Historical analysis of accidents occurred in seaports, *Safety Science* 42, 2004, pp. 85-98.
40. Darbra, R.M., Palacios, A., Casal, J. Domino effect in chemical accidents: main features and accident sequences. *Journal of Hazardous Materials* 183, 2010, pp. 565–573.
41. Davidsson, G., Haeffler, L., Ljungman, B. Frantzich, H. *Handbok för riskanalys*. Räddningsverket, Karlstad. 2003.
42. Delvosalle Christian, Fievez Cécile, Pipart Aurore, Debray Bruno. ARAMIS project: A comprehensive methodology for the identification of reference accident scenarios in process industries. *Journal of Hazardous Materials* 130. 2006. pp. 200–219.
43. Díaz Alonso Fernando. Análisis de consecuencias y zonas de planificación para explosiones industriales accidentales (en el ámbito de las directivas SEVESO). Trabajo presentado para optar al Grado de Doctor por la Universidad de Murcia. Murcia, 10-de mayo de 2006.
44. Directiva Europea Seveso-II. (Directiva 96/82/EU). Artículo 8. 1996.
45. Directiva Europea Seveso-III. (Directiva 2012/18/EU). Artículo 9. 2012.
46. DM 151/2001, Decreto Ministeriale 9/5/2001 n.151, Official Journal of Italian Republic (*Gazzetta Ufficiale*), Rome.
47. Eisenberg, N.A., Lynch, C.J., Breeding, R.J. *Vulnerability Model: A Simulation System for Assessing Damage Resulting from Marine Spills*. Rep. CG-D-136-75, Enviro Control Inc., Rockville, 1975, MD.
48. El Hajj Carine, Piatyszek Eric, Tardy Alicja, Laforest Valeerie. Development of generic bow-tie diagrams of accidental scenarios triggered by flooding of industrial facilities (Natech). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 36, 2015, pp. 72-83.
49. Gledhill, J. & Lines, I. *Development of Methods to Assess the Significance of Domino Effects from Major Hazard Sites*. CR Report 183. Health and Safety Executive, 1998, London.
50. Gómez-Mares M., Zárate L., Casal J., 2008, Jet Fires and the domino effect. *Fire Safety Journal* 43, 2008, pp. 583-588.
51. Guo Lijie, Kang Jianxin. An extended HAZOP analysis approach with dynamic fault tree. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 38, 2015, pp. 224-232.
52. Hemmatian B, Bahman. Abdolhamidzadeh, Darbra R.M., Casal J. The significance of domino effect in chemical accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 29. 2014. pp. 30-38.

-
53. Hemmatian B, Planas-Cuchi E, Casal J. Fire as a primary event of accident domino sequences: the case of BLEVE. *Reliability Engineering and System Safety* 139, 2015, pp. 141-148
 54. Heymes Frederic, Aprin Laurent, Slangen Pierre, Lapébie Emmanuel, Osmont Antoine, Dusserre Gilles. On the Effects of a Triple Aggression (Fragment, Blast, Fireball) on an LPG Storage. *Chemical engineering transactions*. Vol. 36, 2014. ISBN 978-88-95608-27-3, ISSN 2283-9216
 55. Ibarra-Hernández Eusebio V., Goya-Valdivia Félix A., Guerra- Valdés Belkis F., Dupin-Fonseca Marlene. Técnicas utilizadas para la identificación y valoración de los peligros en las distintas etapas de la vida de los procesos químicos industriales. *Revista Centro Azúcar en el* Vol. 41, No.1 del 2014, pp. XXX
 56. Ibarra-Hernández Eusebio V., Goya-Valdivia Félix A., Guerra- Valdés Belkis F., Dupin-Fonseca Marlene. Caracterización y usos de las “técnicas cualitativas” de identificación y valoración de peligros en los procesos químicos industriales”. *Revista Centro Azúcar en el* Vol. 42, No.1 del 2015, pp. 22-33
 57. Ibarra-Hernández Eusebio V., Goya-Valdivia Félix A., Guerra- Valdés Belkis F., Dupin-Fonseca Marlene, (a). Caracterización y usos de las “técnicas cuantitativas” de valoración de riesgos en los procesos químicos industriales, Vol. 42 Número 4, 2015, pp. 26 -36.
 58. Jinhua MI, Yanfeng LI, Hong-Zhong Huang, Yu Liu. Xiao-Ling ZHANG. Reliability analysis of multi-state system with common cause failure based on bayesian networks. *Maintenance and Reliability* Vol.15, No. 2, 2013. pp. 169–175.
 59. Jujuly M. M, Rahman A, Ahmed S, Khan F. LNG pool fire simulation for Domino effect analysis. *Reliability Engineering and System Safety* 143, 2015, pp. 19–29.
 60. Kadri Farid, Chatelet Eric. Domino Effect Analysis and Assessment of Industrial Sites: A Review of Methodologies and Software Tools. *International Journal of Computers and Distributed Systems*. Vol. No.2, Issue III, Feb-March 2013, pp. 1-10. ISSN: 2278-5183.
 61. Kadri Farid. The Assessment of Risk Caused by Fire and Explosion in Chemical Process Industry, a Domino Effect-Based Study. *Journal of Risk Analysis and Crisis Response*, Vol. 3, No. 2. August 2013, pp. 66-76
 62. Kardell Leo, Löf Mathias. QRA with respect to domino effects and property damage. Division of Risk Management and Societal Safety, Lund University, Sweden. Report 5461, Lund 2014. ISSN: 1402-3504. ISRN: LUTVDG/TVBB--5461—SE. pp. 1 – 78
 63. Khakzad Nima, Application of dynamic Bayesian network to risk analysis of domino effects in chemical infrastructures. *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 138, June 2015, pp. 263-272
 64. Khakzad Nima, Khan Faisal, Amyotte Paul, Cozzani. Valerio. Domino Effect Analysis Using Bayesian Networks. *Risk Analysis*. Volume 33, Issue 2, February 2013, pp. 292–306

65. Khan, F. I., Abbasi, S.A. Techniques and methodologies for risk analysis in chemical process industries. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 11, 1998, pp. 261-277.
66. Kirchsteiger, K. Risk Assessment and Management in the Context of the Seveso II Directive. *Industrial Safety Series*, vol. 6, 1998. Elsevier, Amsterdam.
67. Kourniotis S.P., Kiranoudis C.T., Markatos N.C., Statistical analysis of domino chemical accidents, *Journal of Hazardous Materials*. 71. 2000, pp. 239–252
68. Landucci, G., Gubinelli, G., Antonioni, G., Cozzani, V. The assessment of the damage probability of storage tanks in domino events triggered by fire. *Accident Analysis and Prevention* 41, 2009, pp. 1206-1215.
69. Landucci, G., Molag, M., Reinders, J., Cozzani, V. (a). Experimental and analytical investigation of thermal coating effectiveness for 3 m³ LPG tanks engulfed by fire. *Journal of Hazardous Materials* 161, 2009, pp. 1182-1192.
70. Lees, F.P. Loss prevention in process industries, vol. 1–3, 1996, Butterworths, London.
71. Lisi Roberto, Consolo Giancarlo, Maschio Giuseppe, Milazzo Maria Francesca. Estimation of the impact probability in domino effects due to the projection of fragments. *Process Safety and Environmental Protection*, In Press 93, 2015, pp. 99 – 110
72. Mannan, S. Lees' Loss Prevention in the Process Industries, third ed. Elsevier, Oxford. 2005.
73. Marhavilas, P. K., Koulouriotis, D. E., V. Gemeni., Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000-2009. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol.24, 2011, pp. 477-523.
74. Masum. M. Jujuly, Rahman Aziz, Ahmed Salim, Khan Faisal. LNG pool fire simulation for domino effect analysis. *Reliability Engineering and System Safety*. Volume 143. 2015. pp. 19 – 2
75. Mébarki A., Nguyen Q.B., Mercier F. Structural fragments and explosions in industrial facilities: Part II – Projectile trajectory and probability of impact. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Volume 22, Issue 4, July 2009, pp. 417-425.
76. Mentzer. Ray A, Jiaqi Zhang, Wei Xu, M. Sam Mannan. What does 'safe' look and feel like? *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Volume 32, November 2014, Pages 265–275.
77. Milazzo. Maria Francesca, Chiara Vianello, Giuseppe Maschio Uncertainties in QRA: Analysis of losses of containment from piping and implications on risk prevention and mitigation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 36. 2015. pp. 98-107.
78. Mingguang Zhang, Juncheng Jiang. An improved probit method for assessment of domino effect to chemical process equipment caused by overpressure. *Journal of Hazardous Materials*, Volume 158, Issues 2–3, 30 October 2008, pp. 280-286.

-
79. Necci A., Cozzani V., Spadoni G., Khan F. Assessment of domino effect: State of the art and research Needs. *Reliability Engineering and System Safety* 143, 2015, pp. 3–18
 80. Nomen Rosa, Sempere Julià, Mariotti Valeria. QRA Including Domino Effect as a Tool for Engineering Design. 2014 International Symposium on Safety Science and Technology. *Procedia Engineering*, 84, 2014, pp. 23-32
 81. Pasmama Hans, Reniers Genserik. Past, present and future of Quantitative Risk Assessment (QRA) and the incentive it obtained from Land-Use Planning (LUP). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2013, pp. 1- 8.
 82. Perrero Fabio. Incendios de hidrocarburos: estudio de la formación y evolución del boilover de capa fina. Tesis Doctoral. Barcelona, marzo de 2006
 83. Pitblado Robin, Mariana Bardy, Philip Nalpanis, Philip Crossthwaite, Koheila Molazemi, Maarten Bekaert, Vijay Raghunathan. International comparison on the application of societal risk criteria. *Process Safety Progress*. Volume 31, Issue 4, December 2012, pp. 363–368
 84. Pitblado Robin, Weijand Pieter. Barrier Diagram (Bow Tie) Quality Issues for Operating Managers. *Process Safety Progress*. American Institute of Chemical Engineers. Vol.33, No.4. December 2014. pp. 355- 361
 85. Raj Phani K. Large hydrocarbon fuel pool fires Physical characteristics and thermal emission variations with height. *Journal of Hazardous Materials* 140. 2007, pp. 280–292
 86. Rajakarunakaran. Sivaprakasam, Maniram Kumar. A, Arumuga Prabhu .V. Applications of fuzzy faulty tree analysis and expert elicitation for evaluation of risks in LPG refuelling station. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 33. 2015. pp. 109-123
 87. Reniers, G. An external domino effects investment approach to improve crossplan safety within chemical clusters. *Journal of Hazardous Material*, 2010, pp. 177- 167.
 88. Reniers, G., Cozzani, V. *Domino Effects in the Process Industries; Modeling, Prevention and Managing*. Elsevier, 2013. ISBN: 978-0-444-54323-3.
 89. Renjith, V.R. Madhu, G. Individual and societal risk analysis and mapping of human vulnerability to chemical accidents in the vicinity of an industrial area. *International Journal of Applied Engineering Research* 1, 2010, pp. 135-148.
 90. Rezaie, K., Amalnik, M.S., Gereie, A., Ostadi B. & Shakhsheniaee M. Using extended Monte Carlo simulation method for the improvement of risk management: Consideration of relationships between uncertainties. *Applied Mathematics and Computation* 190, 2007, pp. 1492–1501.
 91. Salzano Ernesto, Basco Anna. Simplified model for the evaluation of the effects of explosions on industrial target. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 37. 2015. Pp. 119-123

-
92. Salzano E., Cozzani V. The analysis of domino accidents triggered by vapor cloud explosions. *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 90, Issues 2–3, November December 2005, pp. 271-284.
 93. Shu-Jiaoa Tong, Siu-Mingb Lo, Pei-Honga Zhang, Bao-Zhi Chen. Jet Fire consequence evaluation on the natural gas transported by pipelines. *Procedia Engineering* 52. 2013, pp. 349 – 354
 94. Spoelstra M, Mahesh S, Heezen P, Kooi E. Domino effects at LPG and Propane Storage Sites in the Netherlands. *Reliability Engineering and System Safety* 143, 2015, pp. 85–90.
 95. Sun Biao, Guo Kaihua, Pareek Vishnu K. Computational fluid dynamics simulation of LNG pool fire radiation for hazard analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Volume 29, May 2014, pp. 92-102
 96. Sun Dongliang, Jiang Juncheng, Zhang Mingguang, Wang Zhirong. Influence of the source size on domino effect risk caused by fragments. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 35. 2015, pp.211-223.
 97. Talarico L, Janssens J, Reniers G, Sorensen. K. A decision model to allocate protective safety barriers and mitigate domino effects. *Reliability Engineering and System Safety* 143, 2015, pp. 44–52.
 98. Tauseef S.M., Rashtchian D., Abbasi Tasneem, Abbasi S.A. A method for simulation of vapour cloud explosions based on computational fluid dynamics (CFD). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Volume 24, Issue 5, September 2011, pp. 638-647.
 99. Tong Shu-jiao, Lo Siu-ming, Zhang Pei-hong, and Chen Bao-zhi .Jet Fire Consequence Evaluation on the Natural Gas Transported by Pipelines. *Procedia Engineering* 52 .2013, pp. 349 – 354
 100. Tugnoli, A., Cozzani, V., Di Padova, A., Barbaresi, T. & Tallone, F. Mitigation of fire damage and escalation by fireproofing: A risk-based strategy. *Reliability Engineering and System Safety* 105, 2011, pp. 25–35.
 101. Vasanth S., Tauseef S.M., Abbasi Tasneem, Rangwala A.S., Abbasi S.A. (a). Assessment of the effect of pool size on burning rates of multiple pool fires using CFD. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Volume 30, July 2014, p. 86-94.
 102. Vasanth S., Tauseef S.M., Abbasi Tasneem, Abbasi S.A. Multiple pool fires: Occurrence, simulation, modeling and management. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Volume 29, May 2014, pp. 103-121
 103. Vasanth S., Tauseef S.M., Abbasi Tasneem, Abbasi S.A. CFD simulation of pool fires situated at differing elevation. *Process Safety and Environmental Protection*. Volume 94, March 2015, pp. 89–95
 104. Vílchez A. J., Espejo Vicenç, Casal. Joaquim. Generic event trees and probabilities for the release of different types of hazardous materials. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 24. 2011. pp. 281-287.

105. Vilchez A.J, Montiel H, Casal J. Arnaldos J. Analytical expressions for the calculation of damage percentage using the probit methodology. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 14. 2001, pp. 193–197.
106. Weber P., Medina-Oliva G., Simon C., Iung B. Overview on Bayesian networks Applications for Dependability, Risk Analysis and Maintenance areas. 25, 4, 2012, pp. 671-682
107. Wood, R. Third Party Risk around airports. Retrieved from <http://www.aef.org.uk/downloads/AW+Third+Party+Risk+-+revised+Nov+2010.pdf>.
108. Yaneira E. Saud, Israni, Kumar (Chris), Goddard Jeremy. Bow-Tie Diagrams in Downstream Hazard Identification and Risk Assessment. *Process Safety Progress*. Vol.33, No.1. 2014. pp. 26-35.
109. Zhang B.Y., Li H.H., Wang W. (b) Numerical study of dynamic response and failure analysis of spherical storage tanks under external blast loading. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 34, 2015, pp. 209-217.
110. Zhang Miao, Song Wenhua, Chen Zhen, Wang Ji. (a) Risk Assessment for Fire and Explosion Accidents of Steel Oil Tanks Using Improved AHP Based on FTA. *Process Safety Progress* (Vol.00, No.00), Month 2015, DOI 10.1002/prs.11780
111. Zhang Miao, Song Wenhua, Chen Zhen, Wang Ji. Accident Consequence Simulation Analysis of Pool Fire in Fire Dike *Procedia Engineering*, Volume 84, 2014, pp. 565–577
112. Zhen Chen, Xiaolin Wei. Analysis for Combustion Properties of Crude Oil Pool Fire. *Procedia Engineering*, Volume 84, 2014, pp. 514-523
113. Zhu Pei, Wang Xishi, Tao Changfa. Experiment study on the burning rates of ethanol square pool fires affected by wall insulation and oblique airflow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Volume 61, February 2015, pp. 259-268.



Anexos

ANEXO I. DEFINICIONES Y CONCEPTOS GENERALES

Accidente primario: Escenario accidental que puede iniciar una intensificación (ED).

Accidente secundario: Uno o varios escenarios accidentales provocados por la intensificación del accidente primario.

Accidente terciario: Uno o varios escenarios accidentales provocados por la intensificación del accidente secundario.

ALARP: Abreviatura en inglés de “*As Low As Reasonably Practicable*” que aplicado al riesgo se refiere al valor “más bajo y que sea razonablemente realizable” o “tan bajo como sea razonablemente viable”.

Análisis de las consecuencias de un accidente: Análisis de los efectos esperados de un accidente, independientemente de la frecuencia y de la probabilidad

Análisis de riesgos: Conjunto de técnicas, pueden ser tanto cualitativas como cuantitativas, que consisten en la identificación, análisis y evaluación sistemática de la probabilidad de la ocurrencia de daños asociados a los factores externos (fenómenos naturales, sociales), fallas en los sistemas de control, los sistemas mecánicos, factores humanos y fallas en los sistemas de administración; con la finalidad de controlar y/o minimizar las consecuencias a los empleados, a la población, al ambiente, a la producción y/o a las instalaciones.

Caracterización de riesgos: Es la documentación de los resultados de la evaluación de riesgos, mencionando los criterios y premisas tomadas para seleccionar la metodología de identificación de peligros y condiciones peligrosas, para analizar, modelar y estimar las consecuencias y la frecuencia, así como las limitaciones de la evaluación.

Condición peligrosa: Estado físico o nivel de operación que puede originar un accidente o gran liberación de energía o sustancias, cuyas consecuencias son daños y/o lesiones.

Consecuencia. Resultado real o potencial de un evento no deseado, medido por sus efectos en las personas, en el ambiente, en la producción y/o instalaciones, así como la reputación e imagen.

Consecuencia: Perjuicio, lesión o detrimento que se produce sobre elementos vulnerables sometidos a los efectos derivados de situaciones de peligro. Las consecuencias pueden ser: sobre la salud y seguridad de las personas (trabajadores o público en general), sobre el medio ambiente o sobre la propiedad (patrimonio o cualquier activo intangible asociado a la imagen de la empresa).

Emergencia: Situación derivada de un accidente, que puede resultar en efectos adversos a los trabajadores, la comunidad, el ambiente y/o las instalaciones y que por su naturaleza de riesgo, activa una serie de acciones para controlar o mitigar la magnitud de sus efectos.

Entorno: Zona que rodea a la instalación, la cual podría verse afectada por los efectos de fugas o derrames de sustancias peligrosas en su interior.

Equipo destino o blanco de intensificación: Unidad que puede ser dañada por un vector de intensificación

Escenario accidental: Representación de daños y/o pérdidas de contención que tengan como resultado final el daño a un equipo.

Escenario de intensificación general: Resultado final de un evento de intensificación (combinación de todas las salidas del evento primario y todos los eventos secundarios y de niveles superiores que realmente tienen lugar)

Escenario de riesgo: Determinación de un evento hipotético, en el cual se considera la ocurrencia de un accidente bajo condiciones específicas, definiendo mediante la aplicación de modelos matemáticos y criterios acordes a las características de los procesos y/o materiales, las zonas potencialmente afectables.

Escenario Secundario: Un escenario donde el accidente es causado por el impacto de uno de los vectores de intensificación generados por el accidente primario.

Estudio de riesgo: Documento que integra la caracterización de riesgos, así como la información técnica empleada en su evaluación; las premisas y criterios aplicados; la metodología de análisis empleada; limitaciones del estudio y el catálogo de los escenarios de riesgos, entre otros.

Evaluación de riesgos: Proceso de identificar peligros o condiciones peligrosas en los materiales y sustancias o en los procesos; analizar y/o modelar las consecuencias en caso de fuga o falla y la frecuencia con que pueden ocurrir, y caracterizar y jerarquizar el riesgo resultante.

Evento: Suceso relacionado a las acciones del ser humano, al desempeño del equipo o con sucesos externos al sistema que pueden causar interrupciones y/o problemas en el sistema. En este documento, evento es causa o contribuyente de un incidente o accidente o, es también una respuesta a la ocurrencia de un evento iniciador.

Frecuencia: Número de ocasiones en que puede ocurrir o se estima que ocurra un evento en un lapso de tiempo.

Gestión de los riesgos: El conjunto de medidas tomadas para lograr, mantener o mejorar la seguridad de la instalación y de su funcionamiento.

Identificación de riesgos: Determinación de las características de los materiales y sustancias y las condiciones peligrosas de los procesos e instalaciones, que pueden provocar daños en caso de presentarse una falla o accidente.

Impacto: Efecto probable o cierto, positivo o negativo, directo o indirecto, reversible o irreversible, de naturaleza social, económica y/o ambiental que se deriva de una o varias acciones con origen en las actividades industriales.

Incidente: Evento no deseado, inesperado e instantáneo, que puede o no traer consecuencias al personal y a terceros, ya sea en sus bienes o en sus personas, al medio ambiente, a las instalaciones o alteración a la actividad normal de proceso.

Instalación: Conjunto de estructuras, equipos de proceso y servicios auxiliares, entre otros, dispuestos para un proceso productivo específico.

Insumo: Sustancias, materiales o recursos que alimentan un proceso.

Intensificación: Propagación de un evento accidental primario a las unidades vecinas, causando su daño y además eventos accidentales “secundarios” trayendo esto consigo un escenario general más severo que el escenario primario que condujo a la intensificación.

Jerarquización: Ordenamiento realizado con base en criterios de prioridad, valor, riesgo y relevancia el cual se realiza con el propósito de identificar aquellas actividades de mayor importancia que pueden afectar la operación de la instalación.

Mitigación: Conjunto de actividades destinadas para disminuir las consecuencias ocasionadas por la ocurrencia de un accidente.

Modelo: Representación simplificada o esquemática de un evento o proceso con el propósito de facilitar su comprensión o análisis.

Modificación o cambio: Acción de alterar el estado o especificación de un material, proceso, equipo, componente o instalación, posterior al diseño, construcción u operación original.

Peligro (situación de peligro): Condición física o química que tiene el potencial de causar daños a las personas, el medio ambiente o los bienes. Los peligros de proceso pueden ser de naturaleza física, química, mecánica o eléctrica. Los peligros se identifican y registran de modo estructurado mediante técnicas PHA.

Pérdida de contención: Fuga o escape de la sustancia de trabajo de un equipo debido a su pérdida de integridad estructural (por ejemplo, debido al daño provocado por un vector de intensificación)

Pérdida de contención: Fuga o salida no controlada de material peligroso, provocada por una falla en alguna parte o componente de las instalaciones (recipientes, tuberías, equipos u otros).

PHA: Acrónimo de “*Process Hazard Analysis*” (Análisis de los Peligros de un Proceso) que engloba una serie de técnicas que permiten la adecuada detección e identificación de peligros, así como su valoración, con el objetivo de determinar aquellas modificaciones que minimizan sus efectos, o en su defecto, controlarlos.

Prevención: Conjunto de medidas tomadas para evitar un peligro o reducir un riesgo.

Probabilidad de ocurrencia: Posibilidad de que un evento acontezca en un lapso dado.

Proceso: Conjunto secuencial interrelacionado de actividades y recursos que transforman insumos en productos, agregándoles valor.

Propagación: Indica la implicación de otras unidades o grupos de equipos que se localizan fuera de las fronteras de la planta donde se provocó el accidente primario (ED externo). En caso de un (ED interno), la propagación tiene lugar dentro de la misma unidad o grupo de equipos.

Resultado final: Evento final que resulte del escenario accidental de un equipo (por ejemplo, una bola de fuego, un dardo de fuego, etc.).

Riesgo: Grado de probabilidad de que se produzca un acontecimiento no deseado con consecuencias determinadas, dentro de cierto período o en circunstancias especificadas. Puede ser expresado tanto como una frecuencia (el número de hechos específicos en la unidad de tiempo) como una probabilidad (la probabilidad de que un hecho específico ocurra), o simplemente una medida o índice que combina la severidad y la probabilidad (a veces incluye un factor de exposición) asociados a un peligro identificado.

Simulación: Representación de un evento o fenómeno por medio de sistemas de cómputo, modelos físicos o matemáticos u otros medios, para facilitar su análisis.

Sistemas de seguridad (para protección de equipos y/o instalaciones): Conjunto de equipos y componentes que se interrelacionan y responden a las alteraciones del desarrollo normal de los procesos o actividades en la instalación o centro de trabajo y previenen situaciones que normalmente dan origen a accidentes o emergencias.

Umbral de intensificación: Carga máxima (radiación térmica, onda de choque o impulso mecánico) que un equipo es capaz de resistir sin que ocurra el fallo o valor mínimo de la sobrepresión, la radiación o el impulso mecánico al cual se puede esperar el daño en el equipo destino

ANEXO II. ANÁLISIS HISTÓRICO DE ACCIDENTES

El ED no resulta un acontecimiento infrecuente o aislado, aspecto este evidentemente confirmado por los estudios realizados a los accidentes ocurridos en los últimos años. (*Abdolhamidzadeh et al., 2009a*)

(*Kourniotis et al., 2000*) examina una serie de 207 accidentes químicos mayores ocurridos de 1960 a 1998 resultando 55% (114) de ellos accidentes que involucran ED, *Figura II.1*, y de estos, el 61,4% tuvieron lugar en países de Europa occidental, el 27,5% en norte américa y el resto en otros países



Figura II.1. Accidentes dominó involucrados en el estudio, (*Kourniotis et al., 2000*)

II.1. Áreas geográficas y países involucrados

(*Clini et al., 2010*) en su trabajo “Análisis histórico de accidentes que involucran el ED” analizó 261 accidentes, todos relacionados con el ED, de estos accidentes el 57% ocurrió en Australia, Canadá, Japón, Nueva Zelanda, Noruega y Estados Unidos, 24% en la Unión Europea y el 19% en el resto el mundo

Por otra parte (*Darbra et al., 2010*) analizó las características de 225 accidentes dominó en plantas de proceso, áreas de almacenamiento y en el transporte de materiales peligrosos. De estos accidentes el 56% ocurrió en Australia, Canadá, Japón, Nueva Zelanda, Noruega y Estados Unidos, 25% en la Unión Europea y el 19% en el resto el mundo. Resultados similares a los obtenidos por (*Clini et al., 2010*)

(*Abdolhamidzadeh et al., 2011*) reportaron que el 72% de los accidentes tuvieron lugar en países desarrollados y el 28% en países en desarrollo. Dentro de los países en desarrollo (228%) la India, 34%, el Medio oriente, 12%, Brasil y Europa del este, 8%, China, 7%, y el 31% para el resto de los países en desarrollo.

(*Chen et al., 2012*) analizó un total de 318 accidentes dominó, entre 1951 y 2012, de ellos el 71,1% tuvo lugar en países desarrollados mientras que el 28,9% en países en desarrollo.

Entre los ejemplos de análisis históricos que se han llevado a cabo tenemos que, el análisis de (*Chen et al., 2012*) se centró más en los accidentes ocurridos en los países en desarrollo y por lo tanto sus resultados podrían adecuarse más a nuestras condiciones. El resto de los trabajos se centraron más en los países desarrollados

(Hemmatian et al., 2014) analizaron un total de 330 accidentes dominó, de estos accidentes el 54,5% ocurrió en Australia, Canadá, Japón, Nueva Zelanda, Suiza, Noruega y Estados Unidos, 21,8% en la Unión Europea y el 23,7% en el resto el mundo. Resultados muy parecidos a los obtenidos por (Clini et al., 2010), resultados similares a los de (Clini et al., 2010) y (Darbra et al., 2010).

II.2. Sustancias involucradas

(Kourniotis et al., 2000) en cuanto a las sustancias involucradas se encontró que los vapores de hidrocarburos son los más propensos a provocar los accidentes dominó (58%) seguidos por los combustibles líquidos (49%)

(Darbra et al., 2010) estos autores los accidentes generalmente involucran más de una sustancia, por ejemplo, en su trabajo analizaron 225 accidentes y se vieron involucradas 375 sustancias, sin embargo, para ellos el número de sustancias puede ser superior ya que en muchos accidentes solo se menciona la sustancia que participa en el accidente primario. Las sustancias inflamables, 89% son las que tienen una mayor participación, *Tabla II.1.*

Tabla II.1. Sustancias más frecuentemente involucradas (Darbra et al., 2010)

SUSTANCIAS	NÚMERO DE ACCIDENTES	%
GLP	60	26,7
Petróleo	25	11,1
Gasolina	24	10,7
Nafta	14	6,2
Gasóleo	12	5,3
Tolueno	9	4
Cloruro de vinilo	9	4
Etileno	8	3,6
Óxido de etileno	7	3,1
Gas natural	7	3,1
Cloro	7	3,1
Metanol	6	2,7

(Abdolhamidzadeh et al., 2011) revisaron 224 accidentes dominó, en cuanto al tipo de sustancia peligrosa involucrada en estos eventos encontró que el 89% eran sustancias inflamables, el 4% tóxicas y el 7% el resto.

(Chen et al., 2012) en este estudio las sustancias inflamables resultaron las de mayor participación en los accidentes dominó con el 74,52% y dentro de éstas: GLP 22,6%, gasolina 9,7% y petróleo crudo 9,4% resultando entre las no inflamables las de mayor incidencia el Cloro 3,1%, Amoniaco anhidro 1,6% y Nitrato 1,6%.

(Hemmatian et al., 2014) coinciden con (Darbra et al., 2010) en que los accidentes generalmente involucran más de una sustancia, por ejemplo en su trabajo analizaron 330 accidentes y se vieron involucradas 537 sustancias, sin embargo para ellos el número de sustancias es superior ya que en muchos accidentes solo se menciona la sustancia que participa en el accidente primario, pero las sustancias inflamables siguen siendo las de mayor participación en este caso con un 83% en esta ocasión seguidas por las sustancias tóxicas 27% y las sustancias

corrosivas 7% (el porcentaje supera el 100% porque como en otros estudios más de una sustancia participa en más de un accidente), en la *Tabla II.2* se relacionan las sustancias involucradas en el estudio

Tabla II. 2. Sustancias más frecuentemente involucradas (Hemmatian et al., 2014)

SUSTANCIAS	NÚMERO DE ACCIDENTES	%
GLP	72	22
Gasolina	33	10
Petróleo	29	9
Gasóleo/fuel oil	20	6
Nafta	14	4
Cloruro de vinilo	13	4
Cloro	11	3
Gas natural	11	3
Amoníaco	10	3
Óxido de etileno	10	3
Otras sustancias	314	95
Total	537	162*

* Los porcentajes son superiores a 100 debido a la participación de más de una sustancia en varios accidentes.

II.3. Origen

Según (*Abdolhamidzadeh et al., 2011*) el 80% de los accidentes tuvo lugar en instalaciones fijas y el 20% restante durante la transportación, reportando además que dentro de los diferentes medios de transportación el mayor porcentaje de accidentes dominó le correspondió al transporte por ferrocarril 39%, transporte por carreteras 40%, barcos 13% y por tuberías 8%.

(*Chen et al., 2012*) según su estudio el 41,8% de los accidentes ocurrió en áreas de almacenamiento tanto en áreas abiertas como en depósitos bajo techo, el 33,7% en áreas de proceso, 15,1% en la transportación y el 9,4% en la carga y la descarga.

(*Darbra et al., 2010*) toman las categorías definidas por la base de datos MHIDAS; procesos, almacenamiento, transportación, carga y descarga, depósitos, almacenes bajo techo y áreas comerciales, *Tabla II.3*.

Tabla II. 3. Orígenes generales del accidente dominó (Darbra et al., 2010)

ORIGEN	NÚMERO DE EVENTOS	%
Áreas de almacenamiento	72	32,1
Plantas de procesos	64	28,4
Transporte	42	18,7
Carga y descarga	30	13,3
Depósitos, almacenes bajo techo	14	6,2
Áreas comerciales	9	4,0
Zonas de residuos	1	0,4

(Hemmatian et al., 2014) también toman para su estudio las categorías definidas por la base de datos MHIDAS y en la *Tabla II.4* muestra los orígenes de los accidentes por ellos estudiados.

Tabla II. 4. Orígenes generales del accidente dominó (Hemmatian et al., 2014)

Origen general	Número de eventos	%	% en la Unión Europea	% en otros países desarrollados	% en el resto del mundo
Plantas de procesos	127	38,5	44,4	37,8	34,6
Áreas de almacenamiento	109	33,0	31,9	32,8	34,6
Transporte	53	16,1	6,9	20,6	14,1
Carga y descarga	35	10,6	12,5	10	10,3
Depósitos, almacenes bajo techo	15	4,5	0	0	7,7
Áreas comerciales	11	3,3	4,2	2,8	3,8
Almacenamiento de residuos	1	0,3	5,6	2,8	1,3
Total	351	106,3	105,5	106,8	106,4

Tabla II. 5. Orígenes específicos del accidente dominó (Hemmatian et al., 2014)

Origen específico	Número de accidentes	Porcentaje
Recipiente de almacenamiento abiertos a la atmósfera	58	18,6
Recipientes de transporte portátiles	42	13,5
Cisterna ferroviaria (carro tanque)	42	13,5
Recipientes de proceso	32	10,3
Tubos y válvulas asociadas	30	9,6
Recipientes de almacenamiento presurizados	28	9,0
Reactores	19	6,1
Tanques contenedores	19	6,1
Barcos	13	4,2
Bombas	11	3,5
Líneas de tuberías	10	3,2
Carro cisterna (carretera)	8	2,6
Intercambiador de calor	7	2,2
Barcaza	4	1,3
Almacenamiento de sólidos	3	1,0
Mangueras	3	1,0
Equipos de proceso que trabajan con fuego directo	3	1,0
Equipos para el movimiento de materiales sólidos	1	0,3
Tanques comerciales pequeños	1	0,3
Total	334	107,3

Como se aprecia en la *Tabla II.4* el origen principal de los accidentes fueron las plantas de proceso, con relación al estudio de (Darbra et al., 2010) se incrementó del 28,4 al 34,6% mientras que las áreas de almacenamiento siguen siendo una de los orígenes fundamentales (33%) esto se explica por el hecho del alto grado de confinamiento que presenta muchas plantas en la actualidad y por la presencia de grandes volúmenes de

almacenamiento de sustancias altamente peligrosas. Estos autores presentan además los orígenes específicos de los accidentes, *Tabla II. 5*

En cuanto a los orígenes específicos de los accidentes dominó es de notar que los recipientes de almacenamiento abiertos a la atmósfera son los que presentan el mayor porcentaje de incidencia, coincidiendo esto con lo reportado por varias fuentes.

II.4. Causas

(*Chen et al., 2012*) estos autores utilizaron para determinar las causas de los accidentes dominó los 19 accidentes ocurridos en China en los últimos 40 años y los resultados se presentan en la *Tabla II.6*, es necesario aclarar que estos resultados no coinciden con otros estudios realizados debido en lo fundamental a que se tomó como muestra los accidentes ocurridos solamente en China, país en vías de desarrollo mientras que los otros trabajos, por ejemplo

Tabla II.6. Causas generales de los accidentes. (Chen et al., 2012),

CAUSA	NÚMERO DE EVENTOS	%
Errores humanos	10	52,63
Fallas técnicas	7	36,84
Eventos naturales	2	10,52

(*Darbra et al., 2010*), *Tabla II.7*, se hace un análisis muy bien detallado, pero basado en las estadísticas de los países desarrollados, resulta claro que las causas en los países desarrollados no van a ser las mismas que las de los países en desarrollo. (*Darbra et al., 2010*) le confieren una gran importancia al conocimiento de las causas que originan el accidente primario en un ED, toma para su estudio las categorías definidas por la base de datos MHIDAS.

Tabla II.7. Causas generales de los accidentes. (Darbra et al., 2010)

CAUSAS	NÚMERO DE EVENTOS	%
Eventos externos (<i>I; E; DE; In; S; T; Te</i>)*	69	30,7
Fallas mecánicas	65	28,9
Factor humano	47	20,9
Falla por impacto	40	17,8
Reacción fuera de control	21	9,3
Fallas de instrumentos	8	3,6
Condiciones alteradas del proceso	5	2,2
Fallas de servicios	3	1,3

* *I-Incendios; E-Explosiones; DE -Descargas eléctricas; In -Inundaciones; S-Sabotajes; T-Temperaturas extremas; Te-Terremoto.*

(Hemmatian et al., 2014) según estos autores, el entender las causa que provocan un accidente es un aspecto de gran ayuda para su prevención. Las causas genéricas que inician un accidente dominó (Tabla II.8).

Tabla II.8. Causas generales de los accidentes (Hemmatian et al., 2014)

Causas generales	No. accidentes	% Total	% en la Unión Europea	% en otros países desarrollados	% en el resto del mundo
Fallas mecánicas	103	35,2	38	38	25
Eventos externos	86	29,4	18	33	33
Errores humanos	72	24,6	26	21	33
Fallas por choques	49	16,7	1	27	7
Reacción fuera de control	25	8,5	13	9	2
Falla de instrumentación	13	4,4	7	4	2
Alteraciones de las condiciones del proceso	9	3,1	4	4	0
Fallas de servicios	5	1,7	1	2	2
Total	359	123,6	108	138	104

El análisis de las fallas, Tabla II.8, en las diferentes partes del mundo muestra que las fallas mecánicas fueron la principal causa de accidentes ED en Europa y otros países desarrollados. Sin embargo, para el caso particular del resto del mundo, la principal causa genérica fueron los errores humanos y los eventos externos.

Tabla II.9. Causas específicas de las fallas mecánicas (Hemmatian et al., 2014)

Causa general	Causa específica	Número de accidentes	%
Fallas mecánicas (35,2%)	Sobrepresión	14	16,1
	Sobrecalentamiento	13	15
	Otras fallas metalúrgicas	10	11,5
	Fugas por bridas y/o acoplamientos	9	10,3
	Fugas o válvulas con fugas	8	9,2
	Mangueras	6	6,9
	Corrosión	4	4,6
	Fatiga	4	4,6
	Fugas por los sellos	4	4,6
	Fallos en la válvula de alivio	4	4,6
	Fallos en las soldaduras	4	4,6
	Fallas por fragilidad	3	3,4
	Uso de materiales incompatibles	2	2,3
	Sobrecarga	2	2,3

Los accidentes asociados a los errores humanos se han incrementado significativamente en los países en desarrollo (33%) comparados con los países desarrollados (26% en la Unión Europea y 21% en el resto de los países desarrollados) esto puede deberse a una mala preparación desde el punto de vista de seguridad de los operadores y a una mala cultura de seguridad en general, además a la no existencia o no aplicación de las

regulaciones al respecto. A continuación se detallan las fallas mecánicas por presentar estas el mayor porcentaje de incidencia, *Tabla II.9*.

II.5. Accidentes primarios y cadena de eventos

Según (*Kourniotis et al., 2000*) la probabilidad de al menos un nivel de intensificación resultó ser de 0,39 (39% del total de accidentes), y la relación entre accidentes terciarios y secundarios fue de 2,4.

Para (*Abdolhamidzadeh et al., 2011*) las explosiones con un 57% seguido de los incendios 43% son los tipos de accidentes primarios que con mayor porcentaje han dado origen a un ED y dentro de las explosiones, las explosiones de nubes de vapor 84% las más representativas mientras que le siguen las físicas 10% y las explosiones de polvo 6%. En cuanto a los tipos de incendios más involucrados, el incendio de charco 80% es el que con mayor porcentaje se manifiesta seguido por el incendio originado por nubes de vapor 12% y los dardos de fuego con el 8%. Estos autores también reportan que el 53% de los eventos dominó no pasan del segundo nivel de intensificación mientras que el 47% llegan a un tercer nivel y más.

Según (*Chen et al., 2012*) las explosiones 52,8% son las más probables a iniciar un ED seguidas por los incendios 47,2%. En este estudio el 76% de los accidentes no sobrepasan el evento secundario mientras que el 24% restante provocó eventos terciarios o de nivel superior, la relación entre accidentes secundarios y terciarios de tres (3).

En este mismo estudio de (*Chen et al., 2012*), para la continuación de la cadena, secuencia secundaria, el patrón más común resultó explosión → incendio (24,8%) seguido por incendio → explosión (23%); incendio → incendio (13,2%) y explosión → explosión (11%) mientras que la explosión → fuga tóxica que sólo representa el 3,4%. En cuanto a la continuación de la cadena de eventos al nivel terciario y superiores la secuencia explosión → incendio → explosión (7,9%) tiene la más alta probabilidad de ocurrencia, seguida por incendio → explosión → incendio (4,4%) y explosión → explosión → incendio (2,3%).

En el trabajo de (*Darbra et al., 2010*), del total de accidentes analizados, el 35,5% comenzó por una explosión; el 32,5% por un incendio y el 32% por una fuga. Del 32% que comenzaron por una fuga, 72 accidentes (62,5%) continuaron con un incendio; (seguido con una explosión en el 67% de los casos y con otro incendio en el 33%). El 37,5% continuó con una explosión (seguido por un incendio en el 78% de los casos; otra explosión en el 18% y por una nube tóxica en un caso).

En la *Figura II.2* se muestra un árbol de eventos con la probabilidad relativa de estas secuencias o cadenas de eventos dominó, analizadas en el párrafo anterior, en este caso en los eventos primarios se incluye la fuga, además de la explosión y los incendios.

El árbol de eventos que se muestra en la *Figura II.3* no tiene en cuenta la fuga como evento primario (la base de datos MHIDAS no lo tiene en cuenta). En este caso el incendio con el 52,4% de los casos y la explosión con el 47,6% serían las principales causas del accidente primario.

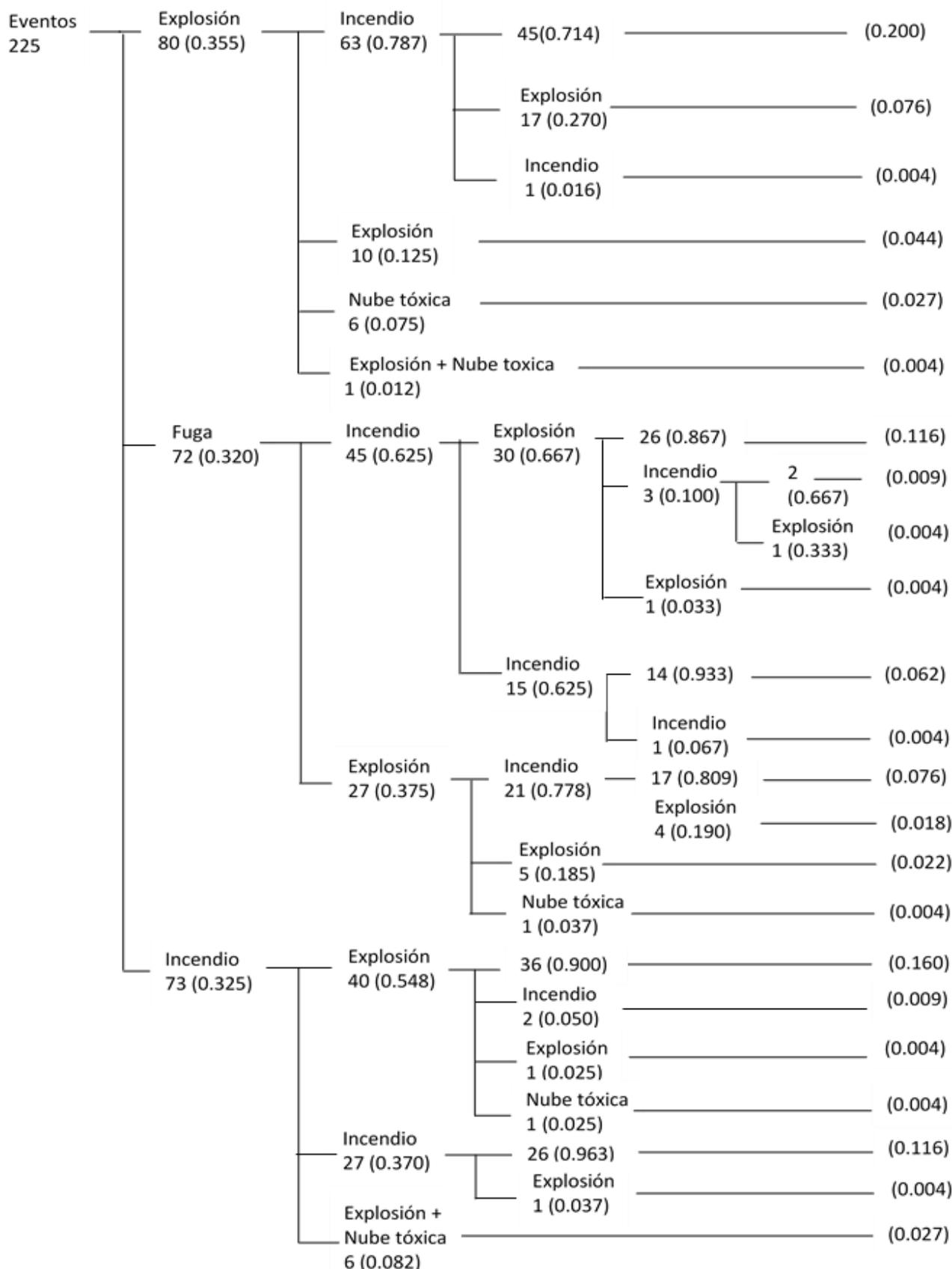


Figura II.2. Árbol de eventos que muestra la probabilidad relativa de las diferentes secuencias de ED, (Darbra et al., 2010)

(Hemmatian et al., 2014) sólo consideraron como eventos primarios la explosión y el incendio, y los resultados de su análisis se muestra en el árbol de eventos de la *Figura II. 4*, donde al final de cada rama se presenta el valor de la probabilidad general de cada secuencia de accidente dominó.

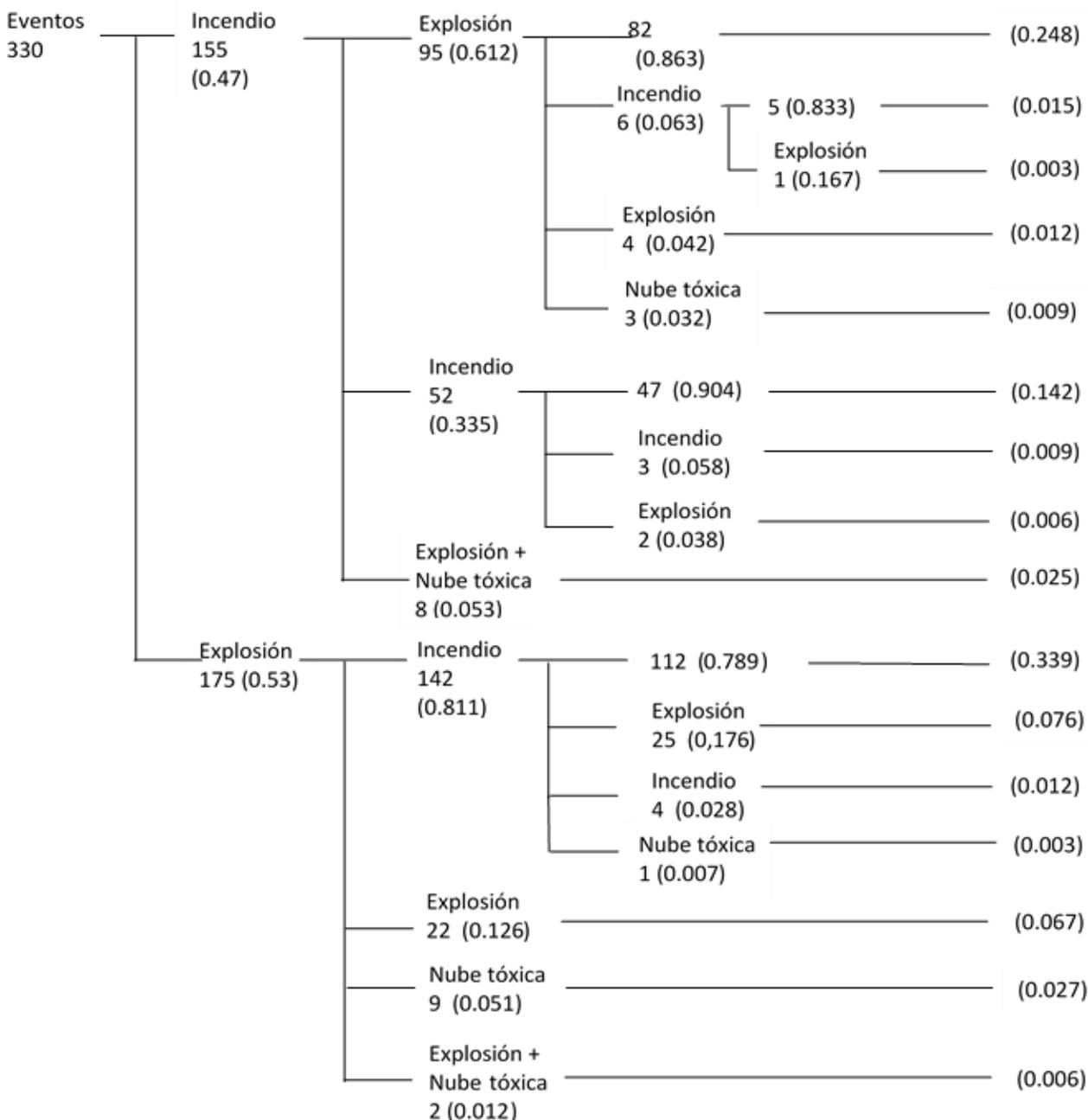


Figura II.4. Árbol de eventos que muestra la probabilidad relativa de las diferentes secuencias de ED (Hemmatian et al., 2014)

En referencia a la *Figura II.4*, de los 330 accidentes dominó analizados en su estudio el 53% comenzó por una explosión (175) y el resto de ellos, (47%) fueron iniciados por un incendio (155). En este caso, si se incluyen en el ED, solamente el evento primario y el secundario son accidentes dominó de “dos-pasos”, que representaron el 85,45% del total de accidentes estudiados. Mientras que los que presentan al menos, tres eventos en la secuencia,

se les denominarán de “tres-pasos”, y representan el 14,54%. Solamente, en los casos estudiados, uno pasó al nivel superior “cuatro-pasos” y la secuencia fue incendio → explosión → incendio → explosión.

De los 155 casos que comenzaron por un incendio como accidente primario, el evento secundario fue una explosión en el 61,2% de las veces, un incendio en el 33,5% y una explosión más una nube tóxica en el 5,3% de los casos, la secuencia de tres-pasos más común fue incendio → explosión → incendio.

La mayoría de las secuencias de dos-pasos iniciadas por una explosión originaron un incendio como evento secundario (81,1%), en el resto de los casos, en un 12,6% de las veces siguió a la primera explosión otra explosión o una nube tóxica (5,1%) o ambos fenómenos en un 1,2%, la secuencia de tres-pasos más común fue explosión → incendio → explosión.

La relación entre los eventos de dos pasos y tres pasos fue de seis (6), coincidiendo con los estudios de (Darbra et al., 2010), aunque no coincide con otros autores, como (Kourniotis et al., 2000) y (Abdolhamidzadeh et al., 2011), estas diferencias pueden ser atribuidas a que los datos en estos primeros estudios fueron obtenidos de fuentes más específicas y el número de eventos ED analizados es menor a los considerados por (Hemmatian et al., 2014).

En publicaciones como, (Nomen et al., 2014) y (Bernechea et al., 2013), se reportan **árboles de eventos específicos** para determinadas pérdidas de contención, en las *Figura II.5 y II.6* se representan los árboles para la fuga instantánea y continua, respectivamente, de un gas licuado inflamable.

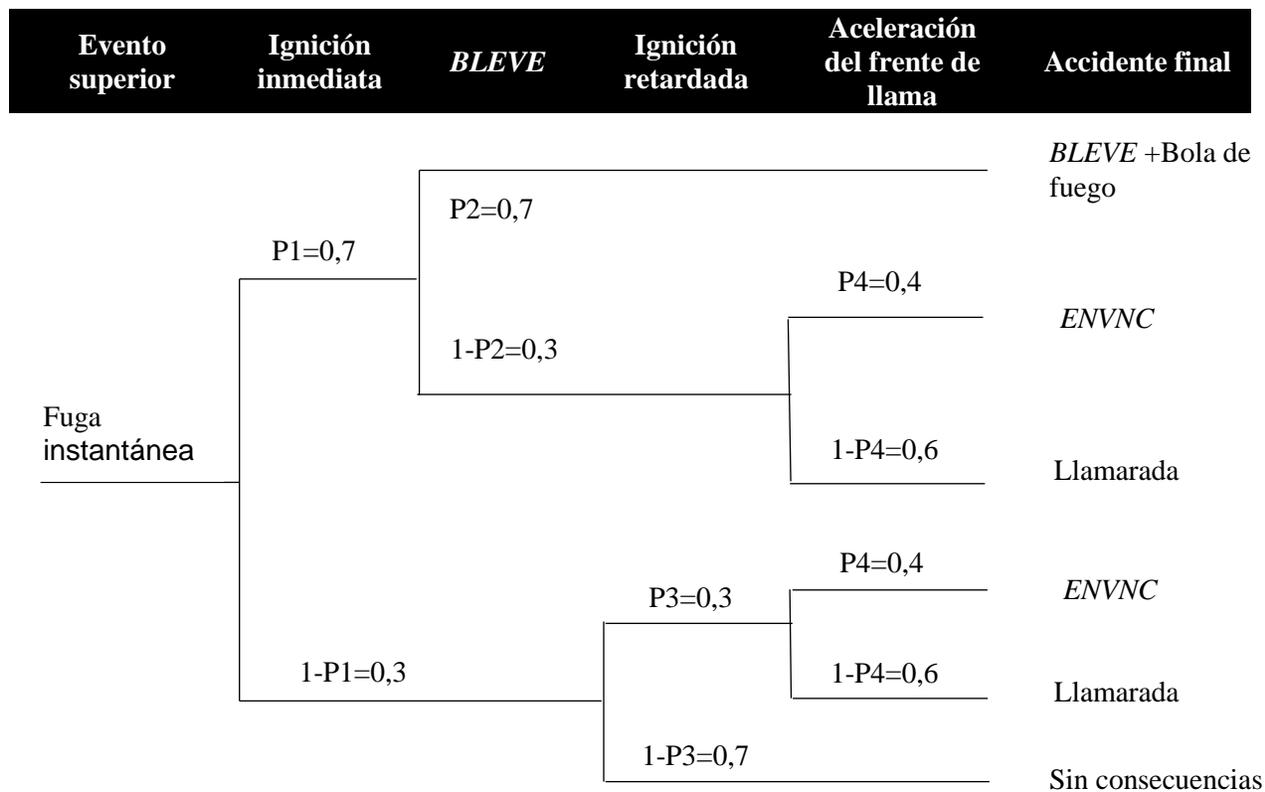


Figura II.5. Árbol de eventos para una fuga instantánea del gas inflamable licuado presurizado

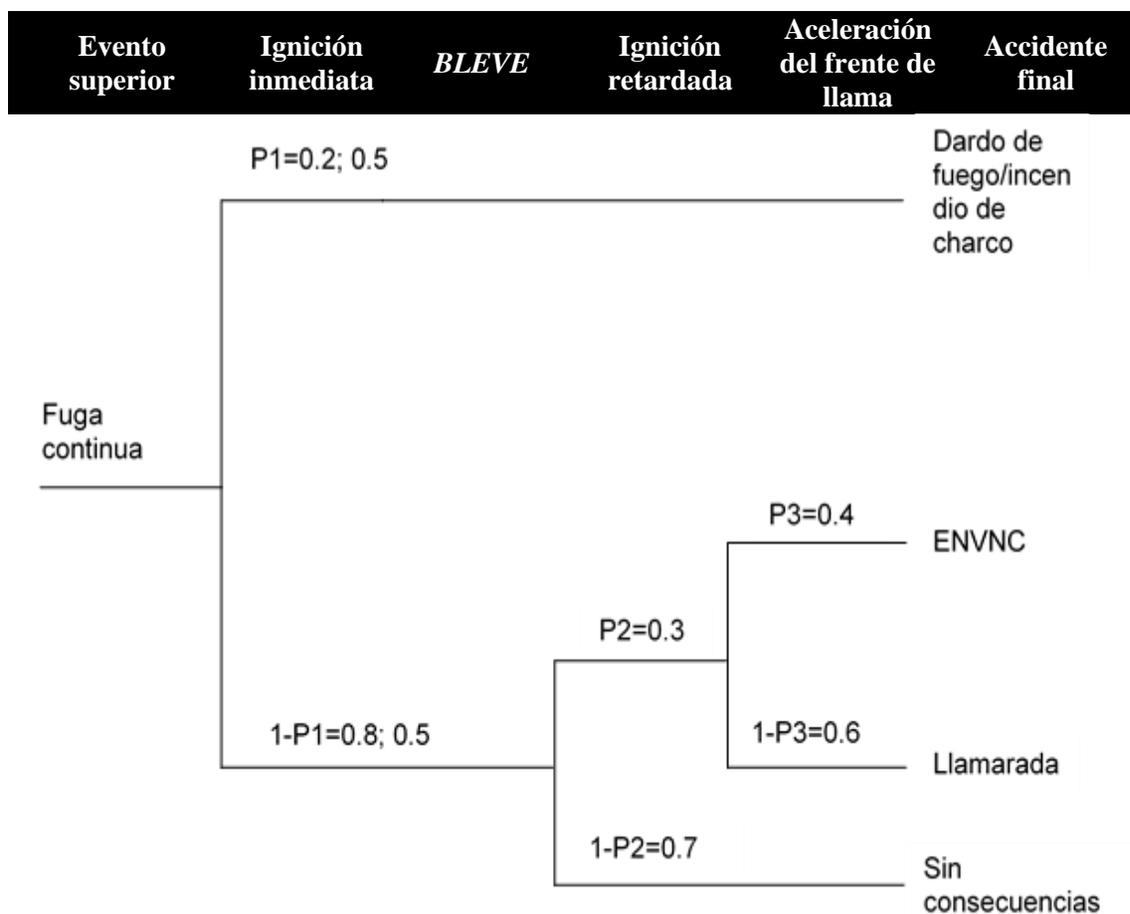


Figura II.6. Árbol de eventos para una fuga continua del gas inflamable licuado presurizado. P1=0,2 se refiere a la PDC G3; P1=0,5 se refiere a la PDC G2

Donde:

PDC G2- Pérdida de contención, escape continuo, a flujo constante, de todo el contenido, en 10 min.

PDC G3- Pérdida de contención, escape continuo por un agujero de diámetro efectivo de 10 mm.

ANEXO III. PROYECCIÓN DE PROYECTILES O FRAGMENTOS

III.1. Principales fuentes de orígenes de la fragmentación en recipientes

En la *Tabla III.1*, a partir de un estudio de más de 180 accidentes que han tenido como origen la proyección de proyectiles, y que se realizó con el objetivo de determinar las causas que dieron lugar a las explosiones generadoras de los fragmentos, se muestra un resumen de los principales orígenes de este fenómeno, publicado (*Díaz, 2006*).

Tabla III.1. Principales orígenes de la proyección de proyectiles. (Díaz, 2006)

ORIGEN DE LA PROYECCIÓN DE PROYECTILES	%
BLEVE con incendio	62
BLEVE sin incendio	12
Explosión física	10
Explosión confinada	10
Reacción fuera de control	6

III.2. Número de fragmentos

Según (*Díaz, 2006*), el número de fragmentos formados en la rotura de un recipiente varía ampliamente, dependiendo de las causas de la rotura, de la geometría del contenedor y de las condiciones de almacenamiento. Las roturas de los recipientes se clasifican en dúctiles y frágiles. Las primeras, que son las más frecuentes en la industria y producen pocos fragmentos de gran tamaño, con un elevado potencial para producir daños. Las fracturas frágiles producen fragmentos de menor tamaño (*Ahmed et al., 2012*).

En el caso de roturas por debilitamiento del material suelen formarse escasos fragmentos (normalmente 2 en los cilindros, y entre 2 y 5 en las esferas). Si la rotura se produce por sobrepresión interna, la estimación del número y masa de los fragmentos debe basarse en la experiencia. *Por ejemplo*, la rotura de recipientes esféricos suele producir un número elevado de fragmentos, si como se dijo anteriormente la rotura es por sobrepresión interna, de tamaño más o menos similar, donde el número mínimo que reporta la literatura es de tres (3) y el máximo es de 35. En la *Figura III.1* se muestran las roturas más habituales de los recipientes, (*Díaz, 2006*).

En los recipientes cilíndricos (*Díaz, 2006*), la rotura inicial se produce normalmente en dirección axial, aunque ésta suele continuar de forma circular, provocando la aceleración y lanzamiento de los extremos semiesféricos. Es habitual que los cilindros experimenten roturas dúctiles cerca de uno de los extremos (originando dos fragmentos) o por ambos (originando tres), aunque en alguna ocasión también se ha observado la rotura frágil, originando gran número de ellos, de diez a treinta, *Figura III.2*.

Para conocer el alcance de los fragmentos producidos en el estallido de recipientes es necesario estimar la velocidad inicial de los mismos y las condiciones aerodinámicas de su desplazamiento por el aire. La velocidad inicial es consecuencia de la aceleración provocada por dos fuerzas diferentes. Una es consecuencia de la diferencia de presiones del interior del recipiente y la atmosférica; la otra es la producida por la presión dinámica,

o viento de la explosión. En la práctica, la fuerza debida a la diferencia de presiones actúa durante un tiempo muy corto, por lo que la aceleración de los fragmentos es debida principalmente al viento de la explosión (Díaz, 2006) y (Sun et al., 2015).

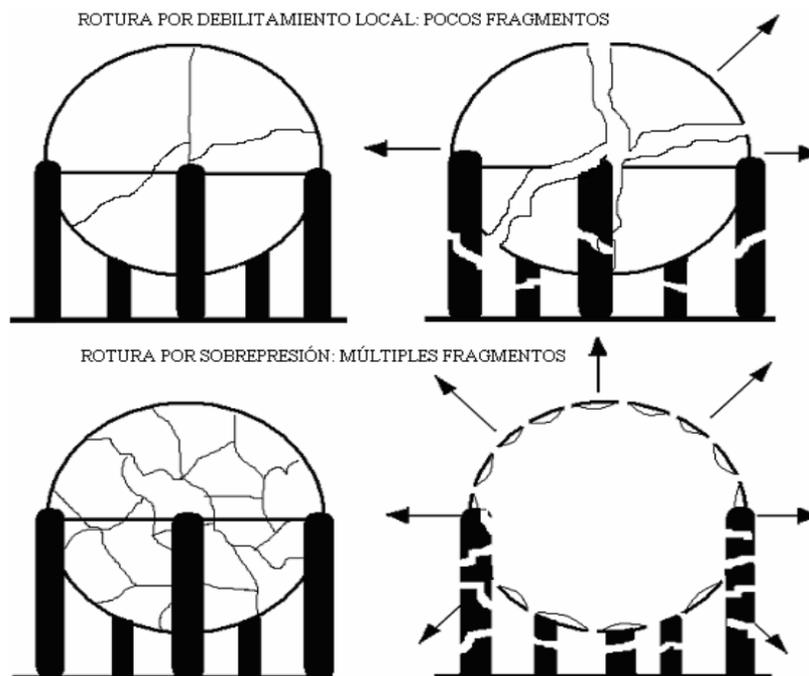


Figura III.1. Tipos de roturas en recipientes esféricos (Díaz, 2006)

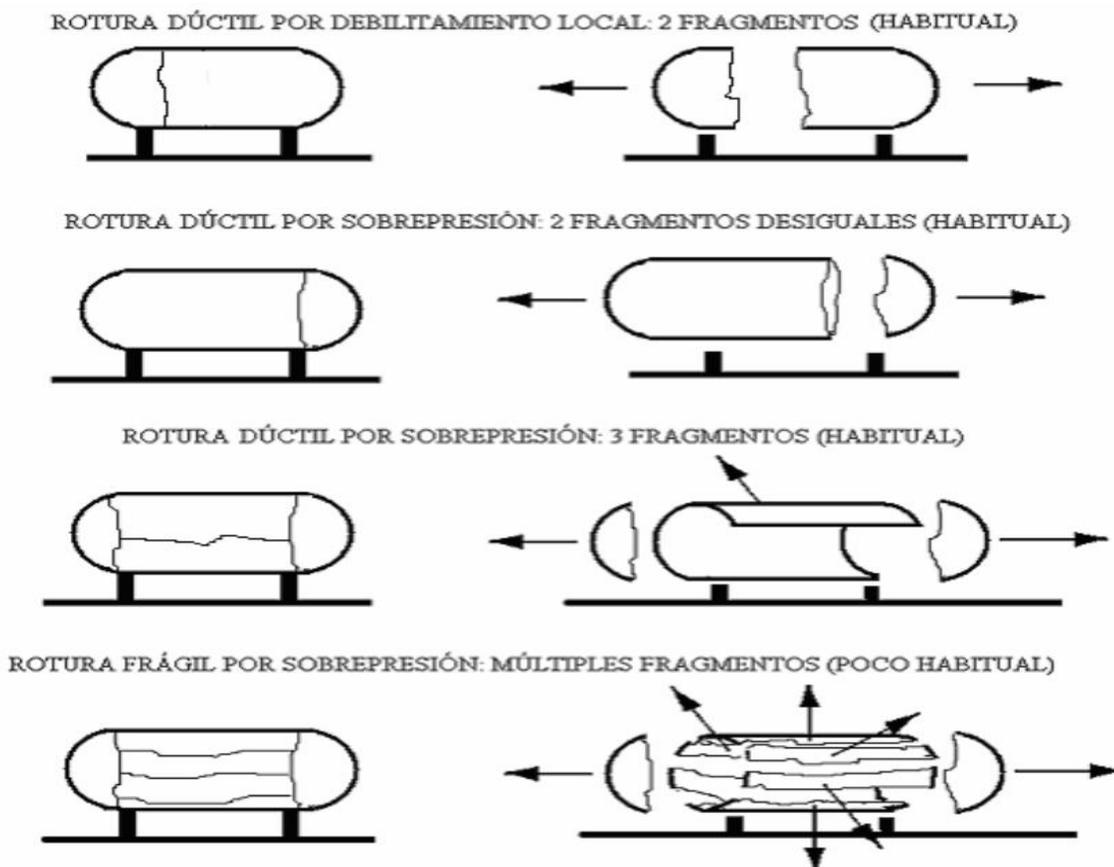


Figura III.2. Tipos de roturas en recipientes cilíndricos (Díaz, 2006)

III.3. Método del TNT equivalente (Díaz Alonso, 2006)

Características obtenidas con el método del TNT equivalente

El método del TNT equivalente permite calcular los efectos de cualquier sustancia explosiva por comparación de la energía generada con la que liberaría una cantidad equivalente de TNT (W_{TNT} , kg) que produjera los mismos efectos siendo su secuencia de aplicación la siguiente:

⇒ Determinación de la masa de TNT equivalente a la cantidad de sustancia que participa en la explosión

$$W_{TNT} = \alpha \frac{E_{exp}}{4.6 \times 10^6} \quad \text{Ec. III.1}$$

Siendo α el factor de eficiencia de la explosión, cuya estimación constituye la mayor dificultad e incertidumbre del método. Asimismo, 4.6×10^6 J/kg es la energía liberada en la explosión de un kg de TNT.

⇒ Cálculo de la “distancia escalada” (z' , $m/kg^{1/3}$), que depende de la masa de TNT equivalente y de la distancia (z , metros) a la que se desean conocer las magnitudes peligrosas de la onda de presión.

$$z' = \frac{z}{W_{TNT}^{1/3}} \quad (m/kg^{1/3}) \quad \text{Ec. III.2}$$

donde: z es la distancia desde el origen de la explosión al punto donde se desee estimar la sobrepresión (*Figura III.3*) o el impulso (*Figura III.4*). En este último caso se obtiene el impulso escalado de TNT, i_{TNT} , cuya expresión es la siguiente:

$$i_{TNT} = \frac{i}{W_{TNT}^{2/3}} \quad (Pa \cdot s / kg^{2/3}) \quad \text{Ec. III.3}$$

A partir del valor de i_{TNT} hallado se puede determinar el impulso mecánico, i .

⇒ Obtención de la sobrepresión (P_s , Pa) e impulso escalado (i_{TNT} , $Pa \cdot s / kg^{1/3}$) a partir de las relaciones con la “distancia escalada” indicadas en las *Figuras III.3* y *III.4*.

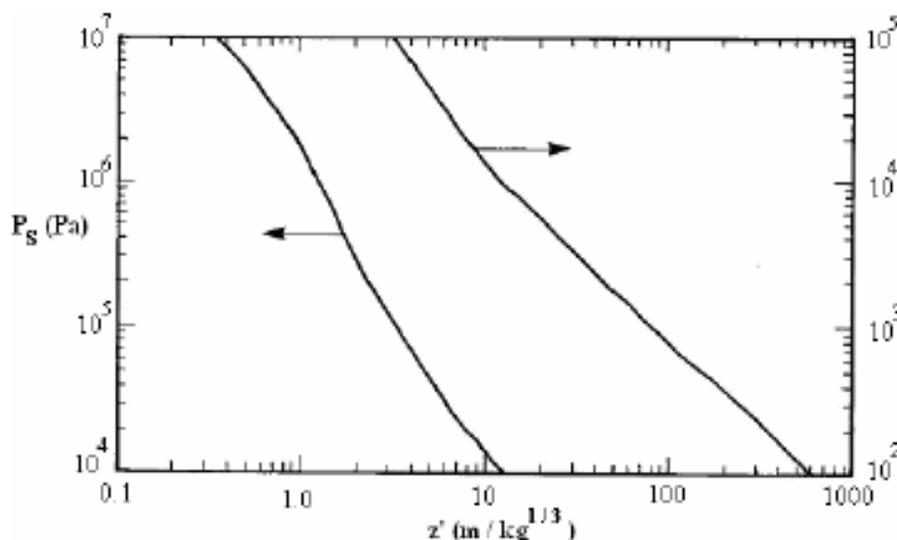


Figura III.3. Sobrepresión de la onda en función de la distancia escalada, (Díaz, 2006)

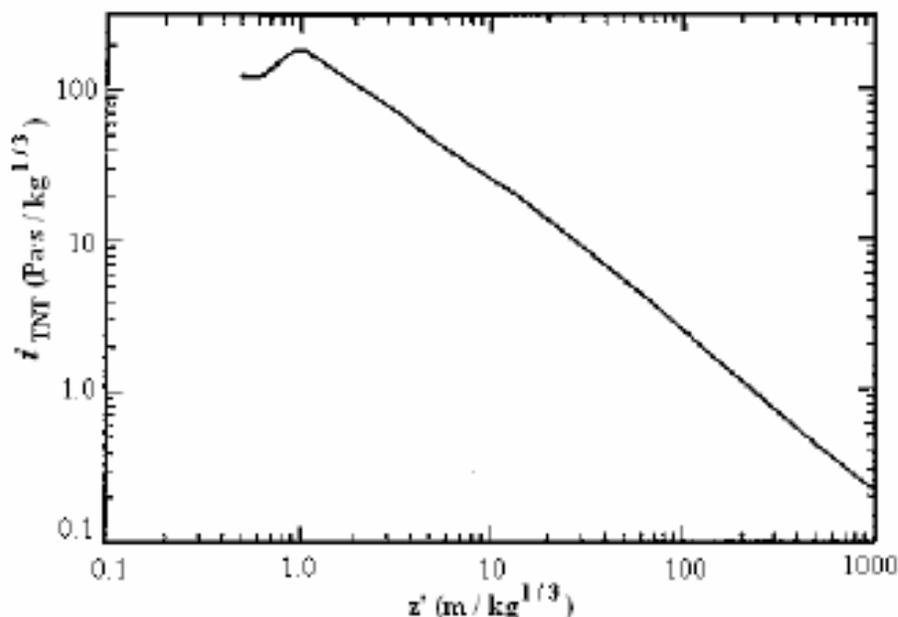


Figura III.4. Impulso escalado en función de la distancia escalada, (Díaz, 2006)

Para obtener las curvas características se parte de las *Figuras III.3 y III.4* y se ajustan las relaciones P_s vs z' ; i_{TNT} vs z' mediante funciones potenciales, con las siguientes formas:

$$P_s = A_1 * z'^{A_2} \quad \text{Ec. III. 4}$$

$$i_{TNT} = A_3 * z'^{A_4} \quad \text{Ec. III. 5}$$

Los valores de A_1 ; A_2 ; A_3 y A_4 se indican en la *Tabla III.2*.

Tabla III.2. Parámetros de las ecuaciones de sobrepresión e impulso escalado, (Díaz, 2006)

INTERVALO z'	ECUACIÓN DE SOBREPRESIÓN		ECUACIÓN DE IMPULSO ESCALADO	
	A_1	A_2	A_3	A_4
$1 \leq z' < 10$	$1,13 * 10^6$	-2,01	203	-0,91
$10 \leq z' \leq 200$	$1,83 * 10^5$	-1,16	335	-1,06

A partir de las ecuaciones anteriores de sobrepresión e impulso escalado y de la ecuación *Ec. III.2* se obtiene, para cada intervalo, una característica con la siguiente forma general:

$$i = \alpha_{TNT} * W_{TNT}^{\frac{1}{3}} * P_s^{\beta_{exp}} \quad \text{Ec. III. 6}$$

$$i = \alpha_{exp} P_s^{\beta_{exp}} \quad \text{Ec. III. 7}$$

Comparando las ecuaciones *Ec. III. 6 y III. 7*, el factor α_{exp} depende en este caso de la masa equivalente de TNT que participa en la explosión (W_{TNT}), pero no así el exponente β_{exp} , que sólo depende del intervalo de ajuste. En la *Tabla III.3* se recogen los valores de α_{TNT} y β_{exp} .

Tabla III.3 Características para el método TNT equivalente, (Díaz, 2006)

Intervalo R'	α_{TNT}	β_{exp}
$1 \leq z' < 10$	$3,7 \cdot 10^{-1}$	0,45
$10 \leq z' \leq 200$	$5,2 \cdot 10^{-3}$	0,91

Método gráfico

Los resultados de los epígrafes anteriores demuestran que hay una relación biunívoca de la sobrepresión (P_s) e impulso (i) de la onda generada en cualquier explosión. También se observa que conforme aumenta la masa o energía implicadas en las explosiones, el impulso crece para un determinado valor de P_s , pero desde un punto de vista práctico es razonable plantear que dicho crecimiento tiene límites, definidos por las explosiones de mayor nivel que pueden estimarse posibles, como consecuencia de eventos accidentales en la industria.

En este sentido, accidentes tales como (*Toulouse, Flixborough y Beijing*) han sido considerados como los de mayor importancia respecto a las masas y/o energías puestas en juego. No obstante, para establecer un “dominio máximo aceptable” de las características de las explosiones industriales, se proponen tres casos hipotéticos donde las masas y/o energías implicadas triplican aproximadamente a las estimadas en esos accidentes, por lo que se establece que la característica de cualquier explosión industrial accidental estará situada por debajo de estas características “máximas”.

En la *Figura III.5* se representan cantidades más pequeñas de TNT o energías de la explosión, incluyendo también las líneas de iso-distancias, es decir, las que unen los puntos de diferentes características que corresponden a las mismas distancias. Estos diagramas permiten conocer directamente las magnitudes peligrosas (sobrepresión e impulso) de cualquier explosión a cualquier distancia siendo, por tanto, un instrumento válido para el análisis de consecuencias de estos accidentes y permitiendo una visión general de la relación y la evolución de todas las magnitudes implicadas en las explosiones.

Para obtener las ecuaciones de las mencionadas líneas de iso-distancia para cada intervalo, se debe tomar la ecuación ajustada de sobrepresión y, utilizando la ecuación *Ec.III.1* (para TNT equivalente) se tiene:

$$P_s = A_1 \left[\frac{z}{W_{TNT}^{1/3}} \right]^{A_2} \quad \text{Ec. III.8}$$

$$i = \alpha_{TNT} \frac{1}{A^{A_2}} * z * P_s^{\frac{\beta_{exp}^{-1}}{A_2}} \quad \text{Ec. III.9}$$

Para cada valor de z se obtiene una relación i - P_s que es la ecuación de iso-distancia para el intervalo considerado.

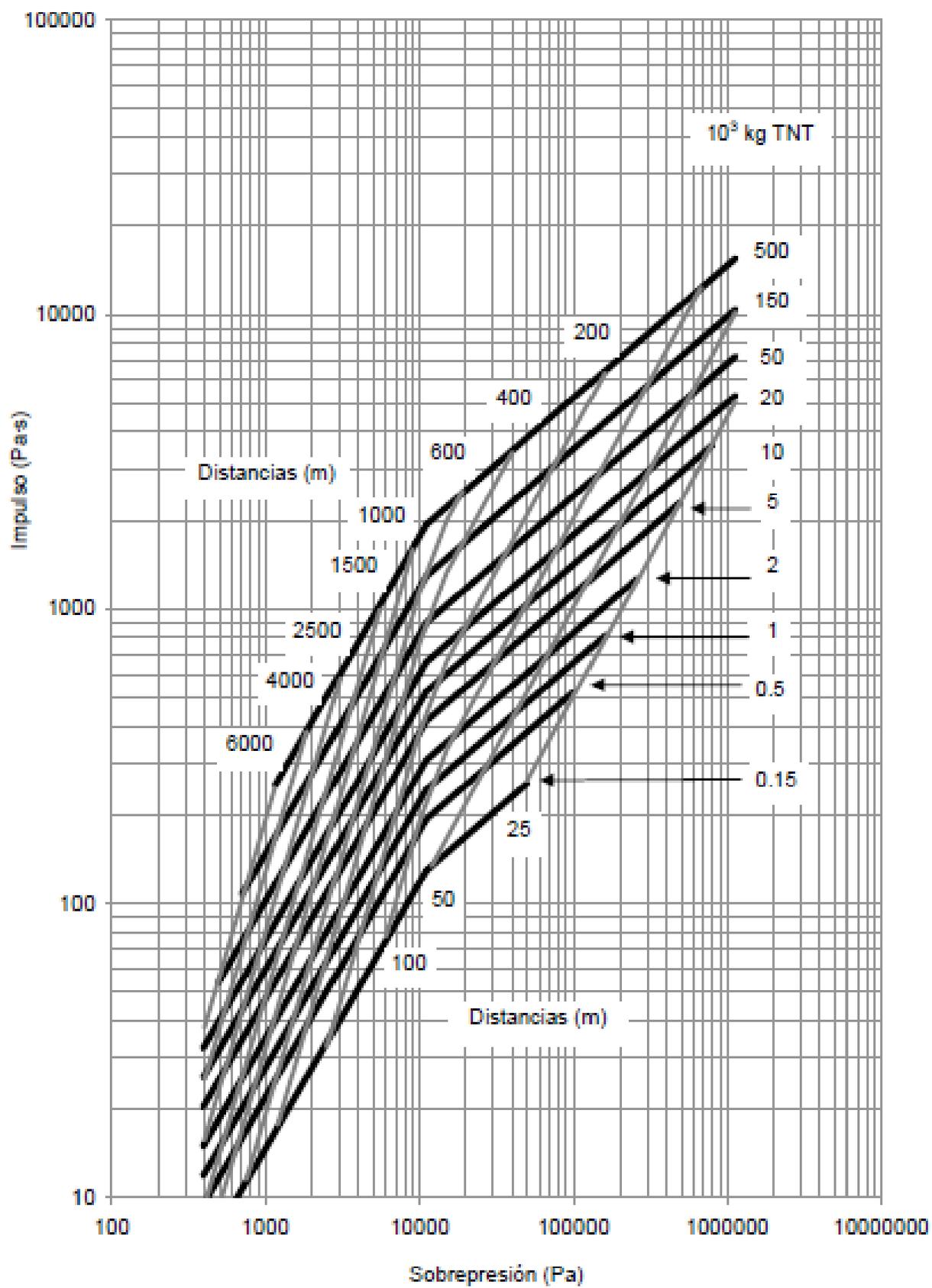


Figura III.5. Características de la detonación de diferentes masas de explosivos (Díaz, 2006)

III. 4. Fotos de accidentes generados por proyección de fragmentos



Figura III.6. Daños producidos en una nave, por el impacto del fragmento de la Figura III.7 en Albert City (Iowa) en 1998, (Díaz, 2006)



Figura III. 7. Fragmento de un recipiente que destruye la nave de la figura IV.6 en una granja en Albert City (Iowa) en 1998. (Díaz, 2006)



Figura III.8. Fragmento de un tanque de GLP que destruye un almacén en una explosión en Monmouth (Illinois) en 2005, (Díaz, 2006)



Figura III.9. Fondo de un recipiente cilíndrico; 1000kg de masa, 3200mm de diámetro y 9 mm de espesor (Tugnoli et al., 2014)



Figura III.10. Cuerpo de un recipiente cilíndrico; 3860kg de masa, tamaño aproximado de 10000x6000 con un espesor de 9mm, (Tugnoli et al., 2014)



Figura III.11. Tapa de un recipiente cilíndrico; 970kg de masa, 3200mm de diámetro y 9 mm de espesor, (Tugnoli et al., 2014)