



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Contribución al análisis de riesgos en el transporte de materiales peligrosos por tubería

Jaime Giovanni Ramírez Camacho

ADVERTIMENT La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del repositori institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) i el repositori cooperatiu TDX (<http://www.tdx.cat/>) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual **únicament per a usos privats** emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei UPCommons o TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a UPCommons (*framing*). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del repositorio institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) y el repositorio cooperativo TDR (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=es>) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual **únicamente para usos privados enmarcados** en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio UPCommons. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a UPCommons (*framing*). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the institutional repository UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) and the cooperative repository TDX (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=en>) has been authorized by the titular of the intellectual property rights **only for private uses** placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading nor availability from a site foreign to the UPCommons service. Introducing its content in a window or frame foreign to the UPCommons service is not authorized (*framing*). These rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA**
BARCELONATECH

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est (EEBE)
Departament d'Enginyeria Química

Contribución al análisis de riesgos en el transporte de materiales peligrosos por tubería

Jaime Giovanni Ramírez Camacho

TESIS DOCTORAL

Barcelona, 2017

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est (EEBE)

Departament d'Enginyeria Química

Contribución al análisis de riesgos en el transporte de materiales peligrosos por tubería

T E S I S

Presentada por

Jaime Giovanni Ramírez Camacho

Para obtener el título de

Doctor con Mención Internacional

Directores de tesis

Dr. Joaquim Casal Fàbrega

Dra. Elsa Pastor Ferrer

Barcelona, 2017



Copyright © 2017 Jaime Giovanni Ramírez Camacho

«Los factores crecientes de riesgo requieren de un enfoque más completo para la administración de esos riesgos, que lo que nuestra riqueza y aislamiento nos han permitido en el pasado».

– Jerome Lederer –

A Mark y Mía.

AGRADECIMIENTOS

«Si he logrado ver más lejos, ha sido porque he subido a hombros de gigantes».

– Isaac Newton –

Deseo expresar mis más sinceras muestras de agradecimiento:

A mi familia por su apoyo constante y su confianza en mí, porque a pesar de no estar presentes físicamente, se que procuran mi bienestar desde mi país, México.

A mi familia en Barcelona, quienes me han brindado todo su apoyo y cariño, y por quienes hoy puedo afirmar que, a pesar de haber venido solo a continuar mis estudios, jamás me he sentido así porque ellos han estado a mi lado cada día.

A mi esposo Mark, por ayudarme a crecer y madurar, por buscar obtener lo mejor de mí y enseñarme lo que soy capaz de lograr. Mi más grande agradecimiento por todo su cariño, apoyo, comprensión y buenos consejos, porque a su lado las cosas malas se convierten en buenas, la tristeza se transforma en alegría y la soledad no existe.

A mis directores de tesis, el Dr. Joaquim Casal y la Dra. Elsa Pastor, por su orientación, apoyo y paciencia durante el desarrollo de esta investigación. Sin duda han sido contribuidores fundamentales a la terminación de mi doctorado.

A mis compañeros de la sala de doctorandos, y a los que hoy ya son doctores, por sus consejos en los momentos de crisis y por ayudarme a recorrer este sendero del conocimiento y de la vida, pero sobre todo por brindarme su valiosa amistad.

A mis amigos que fueron y siguen siendo pilares importantes para mi desempeño como persona, infinitas gracias por estar junto a mí.

Al personal del Departamento de Ingeniería Química, Oficina de Doctorado, Biblioteca, Mantenimiento y Limpieza ya que, dentro del ámbito que a cada uno

Agradecimientos

les compete, me han colaborado sin ponerme ningún impedimento, al contrario, me brindaron siempre una sonrisa.

A la Universidad de Los Andes en Bogotá, Colombia, especialmente al personal y estudiantes del Departamento de Ingeniería Química, mi más sincero agradecimiento a todos ustedes por las facilidades otorgadas durante mi estancia de investigación en sus instalaciones.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de México quien financió este trabajo haciéndolo posible.

A todos los que han contribuido y han estado a mi lado apoyándome en esta etapa de aprendizaje.

El transporte por tuberías se considera comúnmente como una alternativa más segura en comparación con otros modos de transporte, con base en la baja frecuencia de accidentes y el número generalmente limitado de víctimas históricamente registradas. Sin embargo, debido a la creciente extensión de su red, las tuberías atraviesan con frecuencia áreas altamente pobladas e industrializadas, por lo que en caso de una pérdida de contención accidental que involucre una sustancia peligrosa, los daños significativos pueden afectar a un gran número de personas. Al mismo tiempo, dada la estrecha interacción entre las tuberías y las actividades humanas, la frecuencia de ocurrencia de fallos puede llegar a ser significativa. Por otra parte, al cruzar zonas rurales o de alta variedad biológica, puede conllevar un grave impacto ambiental. En algunos de estos accidentes, la escala del evento y la gravedad de sus consecuencias se han incrementado debido al llamado efecto dominó.

En consecuencia, se ha dedicado una creciente atención en los últimos años a la cuantificación del riesgo asociado a esta modalidad de transporte basada en técnicas muy conocidas del Análisis Cuantitativo del Riesgo (ACR). Esta metodología consiste en un procedimiento escalonado en el que se realizan las siguientes fases principales: identificación de los escenarios accidentales, estimación de su frecuencia de ocurrencia, cálculo de sus consecuencias en términos de personas involucradas y áreas dañadas y, finalmente, cuantificación del riesgo general.

Con base en las consideraciones anteriores y con el fin de mejorar el conocimiento de los datos requeridos para llevar a cabo un ACR, en este trabajo se ha realizado un análisis estadístico de datos históricos de accidentes de tuberías terrestres en todo el mundo para ilustrar el riesgo asociado a estos sistemas. Se han desarrollado árboles de eventos detallados para las diferentes

Resumen

categorías de sustancias identificadas y se han calculado las probabilidades condicionales para cada secuencia de pérdida de contención específica.

El análisis histórico de accidentes en tuberías enterradas de gas natural que han involucrado la formación de un cráter, ha permitido evaluar la influencia de los parámetros de la tubería sobre las dimensiones del cráter resultante de la rotura de la misma. Se han obtenido expresiones matemáticas que representan las relaciones de proporcionalidad directa encontradas.

Por último, se propone un modelo matemático, basado en un estudio histórico de accidentes, para estimar la probabilidad de efecto dominó en tuberías paralelas, aéreas o enterradas, asociada a un chorro de fluido y a los efectos térmicos o de erosión resultantes.

Los resultados obtenidos representan un punto de partida útil y necesario para el ACR en el transporte de materiales peligrosos por tubería.

Pipeline transportation is commonly regarded as a safer alternative compared to other transportation modes, based on the low accident frequency and the generally limited number of fatalities historically registered. Nonetheless, due to the continually increasing extension of their network, pipelines often cross highly populated and industrialized areas, so that in case of a loss of containment involving a hazardous substance, significant damages can affect a large number of people. At the same time, given the close interaction between pipelines and human activities, the frequency of occurrence of failures can become significant. On the other hand, when crossing rural areas or with high biological diversity, a serious environmental impact can result. In some of these accidents, the scale of the event and the severity of its consequences have increased due to the so-called domino effect.

Consequently, an increasing attention has been devoted in recent years to the quantification of the risk associated with this transportation mode based on the well-known techniques of Quantitative Risk Analysis (QRA). This methodology consists in a step-wise procedure where the following main phases are carried out: identification of the accident scenarios, estimation of their frequency of occurrence, calculation of their consequences in terms of damaged areas and people involved and, finally, quantification of the overall risk.

On the basis of the above considerations, and with the aim of improving the knowledge of the data required to carry out a QRA, in this paper a statistical analysis of historical data on accidents involving onshore pipelines occurred all over the world has been carried out, to illustrate the risk associated to these systems. Detailed event trees have been developed for the different substance categories identified, and the conditional probabilities for each specific release sequence have been calculated.

Summary

The historical study of accidents in buried natural gas pipelines that have involved the formation of a crater has allowed the assessment of the influence of the pipeline parameters on the dimensions of the crater resulting from the rupture of the pipeline. Mathematical expressions have been obtained to represent the proportionality relationships found.

Finally, a mathematical model, based on a historical survey of pipeline accidents, is proposed to estimate the probability of domino effect in parallel pipelines, aerial or buried, associated to a jet of fluid and to the resulting erosion or thermal effects.

The results obtained represent a useful and needed starting point in QRA of hazardous materials transportation via pipelines.

INTRODUCCIÓN.....	1
1. Perspectiva general	1
2. Motivación.....	3
3. Objetivos	4
4. Aportaciones originales de la tesis.....	5
5. Publicaciones	6
6. Estructura de tesis	7
CAPÍTULO 1. SISTEMAS DE TRANSPORTE POR TUBERÍA Y ANÁLISIS DE RIESGOS.....	9
1.1. Componentes de un sistema de tuberías	9
1.1.1. Tuberías.....	9
a) Tipos de tuberías y fluidos transportados.....	10
A. Líneas de recolección	12
B. Líneas de transmisión.....	12
C. Líneas de distribución	13
1.1.2. Tanques de almacenamiento.....	13
1.1.3. Estaciones de bombeo	14
1.1.4. Estaciones de compresión	15
1.1.5. Estaciones de medición	15
1.1.6. Estaciones de distribución para zonas urbanas.....	16
1.1.7. Estaciones de limpieza	16
1.1.8. Válvulas.....	17
1.1.9. Sistemas de control de la corrosión.....	18
1.1.10. Sistema SCADA	18
1.2. Diseño, construcción y operación de tuberías.....	19
1.2.1. Diseño de tuberías.....	19

Índice de contenido

1.2.2. Construcción de tuberías	20
1.2.3. Operación de tuberías	21
1.3. Accidentes graves	22
1.3.1. Tipos de accidentes	23
a) Fenómenos de tipo térmico: incendios	23
b) Fenómenos de tipo mecánico: explosiones	26
c) Fenómenos de tipo químico: escape de sustancias tóxicas y/o contaminantes	28
1.3.2. Consecuencias	28
1.4. Evolución de una pérdida de contención de una tubería	30
1.5. Riesgo.....	32
1.5.1. Clasificación del riesgo	33
1.6. Análisis de riesgos	33
1.6.1. Identificación de peligros de accidentes graves.....	35
a) Análisis histórico de accidentes	35
A. Procedimiento	36
B. Ventajas y limitaciones	36
C. Resultados y aplicabilidad	36
1.6.2. Cálculo de consecuencias.....	37
1.6.3. Cálculo de frecuencias	37
1.6.4. Estimación o valoración del riesgo total	38
1.7. Efecto dominó.....	39
1.7.1. Elementos de un accidente dominó	39
1.7.2. Vectores de escalamiento.....	40
1.7.3. Efecto dominó en tuberías.....	41
a) Efecto dominó causado por incendios	42
b) Efecto dominó causado por explosiones.....	43
c) Efecto dominó causado por la acción de un chorro abrasivo	43
CAPÍTULO 2. ANÁLISIS HISTÓRICO DE ACCIDENTES EN TUBERÍAS	45
2.1. Introducción.....	45
2.2. Recolección y filtrado de datos.....	46
2.3. Análisis de datos	52

2.3.1. Cobertura de la base de datos	52
2.3.2. Distribución temporal	54
2.3.3. Distribución geográfica	55
2.4. Resultados	56
2.4.1. Tipos de eventos	56
a) Eventos generales	56
b) Eventos específicos	57
2.4.2. Distribución de accidentes según su causa	58
a) Distribución por causa general	58
b) Distribución por causa específica	60
2.4.3. Distribución de accidentes según las características de la tubería	62
a) Distribución por tipo de tubería	62
b) Distribución por diámetro de la tubería	63
c) Distribución por tipo de instalación	63
2.4.4. Partes del sistema de tuberías involucradas en los accidentes	64
2.4.5. Materiales involucrados	64
2.4.6. Densidad de población donde ocurrieron los accidentes	66
2.4.7. Consecuencias de los accidentes	67
a) Consecuencias sobre las personas	67
b) Consecuencias sobre el medio ambiente	69
c) Pérdidas económicas	70
2.5. El transporte por tubería y la planificación del uso del territorio	71
2.6. Conclusiones	73

**CAPÍTULO 3. PROBABILIDADES DE LOS EVENTOS POSTERIORES AL ESCAPE
DE MATERIALES PELIGROSOS DE LAS TUBERÍAS**

3.1. Introducción	75
3.2. Procesamiento de la información	76
3.2.1. Clasificación de los materiales involucrados	76
3.2.2. Tipos de pérdida de contención	78
3.2.3. Causas de fallo	78
3.3. Resultados y discusión	78
3.3.1. Gases comprimidos	79
3.3.2. Gases licuados a presión	84

Índice de contenido

3.3.3. Líquidos volátiles	88
3.3.4. Líquidos con baja volatilidad	94
3.4. Conclusiones.....	97

CAPÍTULO 4. FORMACIÓN DE CRÁTERES POR LA ROTURA DE TUBERÍAS

ENTERRADAS DE GAS NATURAL: UN ANÁLISIS BASADO EN ACCIDENTES HISTÓRICOS

4.1. Introducción.....	99
4.1.1. Descripción de un sistema de tuberías de GN	102
a) Tipos de tuberías	102
b) Profundidad del instalación	103
c) Características del suelo.....	104
4.1.2. Formación de un cráter por la rotura de una tubería enterrada.....	104
a) Causas y energía involucrada.....	105
4.1.3. Posibilidades de efecto dominó por la formación de un cráter.....	107
4.2. Métodos.....	108
4.2.1. Recopilación y organización de los datos	108
4.3. Resultados y discusión	110
4.3.1. Análisis exploratorio.....	110
a) Distribución por diámetro y tipo de tubería	110
b) Distribución según la profundidad de instalación	111
c) Distribución según la presión de operación	112
d) Distribución según la longitud de la rotura.....	112
e) Distribución según las causas.....	113
4.3.2. Análisis de la influencia de los parámetros de la tubería sobre las dimensiones del cráter	114
a) Longitud del cráter	115
b) Profundidad del cráter	115
c) Anchura del cráter	116
4.3.3. Probabilidades condicionales de efecto dominó.....	116
4.4. Conclusiones.....	119

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DEL EFECTO DOMINÓ EN TUBERÍAS

5.1. Introducción.....	121
5.2. Accidentes registrados debido al efecto dominó en tuberías	122
5.3. Posibilidades de efecto dominó.....	126
5.4. Modelado de la incidencia de un chorro sobre una tubería	129
5.4.1. Modelo probabilístico	133
5.4.2. Resultados del modelo	135
5.5. Dardo de fuego.....	140
5.6. Frecuencia del efecto dominó	142
5.7. Conclusiones.....	145
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	147
CONCLUSIONS	151
NOMENCLATURA	153
REFERENCIAS	157
APÉNDICES	175
A. Publicación de los resultados presentados en el Capítulo 2 por la Revista «Safety Science».....	175
B. Publicación de los resultados presentados en el Capítulo 3 por la Revista «Process Safety and Environmental Protection»	177
C. Publicación de los resultados presentados en el Capítulo 5 por la Revista « Journal of Hazardous Materials».....	179
D. Estructura de la base de datos desarrollada para el registro de los accidentes de tuberías recopilados de la literatura	181
E. Accidentes que han involucrado la formación de un cráter por la rotura de una tubería enterrada de gas natural	185
F. Análisis del efecto de los parámetros de la tubería en las dimensiones del cráter	195
F.1. Efecto de los parámetros de la tubería en la longitud del cráter	196
F.2. Efecto de los parámetros de la tubería en la profundidad del cráter	197
F.3. Efecto de los parámetros de la tubería en la anchura del cráter.....	198

G. Cálculo del factor de reducción «q» para las configuraciones reales de tuberías encontradas en la literatura y en otros arreglos	199
G.1. Factor de reducción para $r < R$	199
G.1.1. Caso 1: $r = 12$ in, $R = 18$ in, $d = 50$ in.....	199
G.1.2. Caso 2: $r = 4$ in, $R = 9$ in, $d = 15$ in	201
G.1.3. Caso 3: $r = 3$ in, $R = 4$ in, $d = 14,68$ in.....	203
G.1.4. Caso 4: $r = 12$ in, $R = 24$ in, $d = 80$ in.....	205
G.1.5. Caso 5: $r = 18$ in, $R = 24$ in, $d = 100$ in.....	207
G.2. Factor de reducción para $r > R$	209
G.2.1. Caso 6: $r = 24$ in, $R = 18$ in, $d = 150$ in.....	209
G.2.2. Caso 7: $r = 21$ in, $R = 18$ in, $d = 393,7$ in.....	211
G.2.3. Caso 8: $r = 15$ in, $R = 12$ in, $d = 267$ in.....	213
G.2.4. Caso 9: $r = 12$ in, $R = 9$ in, $d = 312$ in.....	215
G.2.5. Caso 10: $r = 8$ in, $R = 3,31$ in, $d = 129,4$ in.....	217
G.3. Factor de reducción para $r = R$	219
G.3.1. Caso 11: $r = 24$ in, $R = 24$ in, $d = 150$ in.....	219
G.3.2. Caso 12: $r = 18$ in, $R = 18$ in, $d = 118,11$ in.....	221
G.3.3. Caso 13: $r = 12$ in, $R = 12$ in, $d = 100$ in.....	223
G.3.4. Caso 14: $r = 6$ in, $R = 6$ in, $d = 78,74$ in.....	225
G.3.5. Caso 15: $r = 3$ in, $R = 3$ in, $d = 57$ in	227
H. Valores del factor de reducción «q» para las configuraciones reales de tuberías encontradas en la literatura y en otros arreglos	229

LISTA DE TABLAS

1-1. Cobertura mínima para tuberías enterradas	21
1-2. Métodos para el análisis de riesgos	35
1-3. Vectores de escalamiento generados por los diferentes tipos de accidentes primarios.....	41
2-1. Campos de la base de datos desarrollada	48
2-2. Disponibilidad de datos en la base de datos desarrollada (registros totales = 1.063)	53
2-3. Distribución geográfica de los accidentes en tuberías.....	55
2-4. Distribución de las secuencias accidentales	56
2-5. Distribución de los accidentes en tuberías por tipo de eventos específicos	57
2-6. Causas generales de los accidentes en tuberías.....	59
2-7. Causas específicas de los accidentes en tuberías	60
2-8. Tipos de tuberías involucradas en los accidentes.....	62
2-9. Diámetro de las tuberías involucradas en los accidentes.....	63
2-10. Tipo de instalación de las tuberías involucradas en los accidentes.....	64
2-11. Partes del sistema de tuberías donde han ocurrido los accidentes	64
2-12. Principales materiales involucrados en los accidentes en tuberías.....	65
2-13. Clasificación de los accidentes de tuberías en función del tipo de material involucrado.....	65
2-14. Peligros asociados a los materiales involucrados.....	65
2-15. Distribución de los accidentes en tuberías según el volumen de material liberado	66

Lista de tablas

2-16. Distribución de los accidentes en tuberías por densidad de población	67
2-17. Distribución de los accidentes en tuberías según el medio receptor de los materiales liberados	70
2-18. Pérdidas económicas resultantes de los accidentes	71
3-1. Clasificación de las sustancias identificadas	77
3-2. Probabilidades totales para cada evento final de los accidentes en tuberías con gases comprimidos	81
3-3. Distribución de las causas generales y específicas de fallo de las tuberías, según la modalidad de pérdida de contención de gases comprimidos	83
3-4. Probabilidades totales para cada evento final de los accidentes en tuberías con gases licuados a presión.....	86
3-5. Distribución de las causas generales y específicas de fallo de las tuberías, según la modalidad de pérdida de contención de gases licuados a presión	88
3-6. Probabilidades totales para cada evento final de los accidentes en tuberías con líquidos volátiles	91
3-7. Distribución de las causas generales y específicas de fallo de las tuberías, según la modalidad de pérdida de contención de líquidos volátiles	92
3-8. Probabilidades totales para cada evento final de los accidentes en tuberías con líquidos de baja volatilidad.....	95
3-9. Distribución de las causas generales y específicas de fallo de las tuberías, según la modalidad de pérdida de contención de líquidos con baja volatilidad	96
4-1. Cubierta mínima para tuberías enterradas de gas natural.....	103
4-2. Estructura de la base de datos de accidentes en tuberías de gas natural que han involucrado la formación de un cráter.....	108
4-3. Distribución de los accidentes con formación de cráter según su causa ..	114
4-4. Matriz de correlación de Pearson entre las dimensiones del cráter y los parámetros de la tubería	115

4-5. Accidentes dominó en tuberías paralelas de gas natural tras la formación de un cráter.....	118
5-1. Accidentes con efecto dominó en tuberías	123
5-2. Frecuencias de fallo de las tuberías ($m^{-1} \text{ año}^{-1}$).....	143
5-3. Probabilidad de incidencia y frecuencia de fallo de la tubería objetivo ...	144

LISTA DE FIGURAS

I-1.	Longitud total de la red de tuberías de transporte de gas en Europa	2
1-1.	Configuración típica de un sistema de tuberías de transporte de petróleo crudo	11
1-2.	Configuración típica de un sistema de tuberías de transporte de gas natural.....	12
1-3.	Escenarios de tipo térmico en tuberías	24
1-4.	Escenarios de tipo mecánico en tuberías	26
1-5.	Daños potenciales de un accidente grave	29
1-6.	Árbol de eventos para el escape de gases y líquidos peligrosos de una tubería.....	31
1-7.	Etapas de un análisis de riesgos	34
1-8.	Tolerabilidad del riesgo.....	38
1-9.	Mecanismo de difusión del efecto dominó.....	40
1-10.	Mecanismo de propagación del efecto dominó en tuberías.....	41
2-1.	Criterios de búsqueda y selección para extraer los accidentes en tuberías de la base de datos MHIDAS.....	47
2-2.	Metodología de selección de los registros de accidentes en tuberías.....	52
2-3.	Distribución anual de los accidentes en tuberías (período 1980-2014).....	54
2-4.	Distribución de los accidentes en tuberías en función del número de muertos y heridos.....	68
2-5.	Distribución de los accidentes en tuberías en función del número de evacuados	69

Lista de figuras

3-1. Árbol de eventos para la pérdida de contención de gases comprimidos inflamables de una tubería.....	80
3-2. Árbol de eventos para la pérdida de contención de gases tóxicos e inflamables, licuados a presión de una tubería	85
3-3. Árbol de eventos para la pérdida de contención de líquidos volátiles e inflamables de una tubería.....	90
3-4. Árbol de eventos para la pérdida de contención de líquidos inflamables de baja volatilidad de una tubería	94
4-1. Consumo mundial de gas natural durante el período 1980-2014.....	100
4-2. Vista transversal de un cráter formado por la rotura explosiva de un tubería enterrada de gas.....	105
4-3. Representación geométrica de un cráter.....	109
4-4. Distribución de los accidentes de cráteres según el diámetro y tipo de tubería	110
4-5. Distribución de los accidentes según la profundidad de instalación de la tubería.....	111
4-6. Distribución de los accidentes según la presión de operación de las tuberías	112
4-7. Distribución de los accidentes según la longitud de rotura de las tuberías	113
4-8. Árbol de eventos de las secuencias dominó tras la formación de un cráter por la rotura de una tubería enterrada de gas natural.....	117
5-1. Secuencias de efecto dominó tras el escape de un chorro de fluido a alta presión de la tubería fuente	128
5-2. Incidencia de un chorro de fluido entre tuberías de igual diámetro	130
5-3. Sector angular de la tubería fuente que puede contener orificios que impliquen riesgo de incidencia	131
5-4. Ángulo general cubierto por un chorro que puede afectar a la tubería objetivo.....	131
5-5. Límites físicos del ángulo general que puede ser cubierto por un chorro de fluido	132

5-6. Variables geométricas seleccionadas en relación con el modelo probabilístico	134
5-7. Probabilidad de efecto dominó en función de la distancia entre las tuberías fuente y objetivo con el mismo diámetro, D	136
5-8. Caso de una tubería fuente con mayor diámetro que la tubería objetivo..	137
5-9. Probabilidad de efecto dominó en función de la distancia entre las tuberías fuente y objetivo, para las configuraciones de la Tabla 5-1 (ID 3, 4, 5, 6 y 9).....	138
5-10. Probabilidad de efecto dominó en función del diámetro de la tubería objetivo y la distancia entre tuberías, para una tubería fuente de 6 pulgadas de diámetro.....	139
5-11. Probabilidad de efecto dominó en función del diámetro de la tubería objetivo y la distancia entre tuberías, para una tubería fuente de 48 pulgadas de diámetro.....	139
5-12. Alcance de las llamas de un dardo de fuego	142

1. Perspectiva general

Las altamente complejas e interconectadas actividades industriales actuales requieren un flujo continuo de materiales y energía de una zona geográfica a otra. En particular, las enormes cantidades de materiales (principalmente líquidos y gases), a menudo peligrosos, son transportadas desde los sitios de producción/extracción hacia las plantas de procesamiento, y desde éstas a las zonas de consumo final.

El transporte puede realizarse por diferentes modalidades: carretera, ferrocarril, barco (mar/río) o tubería. La mayoría de estas modalidades tienen una fuerte interacción con el territorio, como sucede muchas veces en el transporte a grandes distancias, atravesando zonas rurales y urbanas.

Una de las modalidades más utilizadas en el caso de fluidos es el transporte por tuberías. Cabe señalar que la mayoría de los fluidos transportados son inflamables o tóxicos. Por lo tanto, una pérdida de contención accidental de una tubería involucra cierto riesgo, lo que podría implicar consecuencias potenciales sobre las personas, el equipo y el ambiente. Estas consecuencias dependerán de la cantidad y propiedades del material liberado y de las características de la zona afectada (rural o urbana).

El riesgo inherente a una posible pérdida de contención aumenta en una zona habitada o con intensa actividad industrial en comparación con el existente en una zona rural, debido a la estrecha interacción entre las tuberías y las actividades asociadas a la presencia humana. Sin embargo, incluso en las regiones deshabitadas, un accidente puede tener graves consecuencias sobre el medio ambiente, contaminando el suelo o el agua o dañando áreas de especial interés ecológico. En general, se trata de situaciones complejas.

El transporte por tubería: una alternativa relativamente segura

El transporte de líquidos y gases por tuberías es un aspecto importante de la industria del petróleo y gas y, más generalmente, de la industria de procesos. Después de la Segunda Guerra Mundial, la construcción de tuberías experimentó un gran incremento, conectando diferentes regiones de un país y, cada vez más, diferentes países. Entre los sistemas de tuberías más largos se puede citar el Sistema de Transporte de Gas Natural en Rusia, con diámetros de hasta 1,4 m y 170.000 kilómetros de longitud de tuberías de alta presión, incluyendo tuberías de distribución (Yafimava, 2015), y el Sistema de Oleoducto Trans-Alaska, con un diámetro de 1,2 m y una longitud de 1.300 km (Alyeska Pipeline Service Company [APSC], 2013).

La longitud de las tuberías está aumentando continuamente. Como ejemplo, la Fig. I-1 muestra la variación de la longitud total del sistema de tuberías de transmisión de gas en Europa (European Gas pipeline Incident Data Group [EGIG], 2015); se observa un incremento constante durante las últimas cuatro décadas.

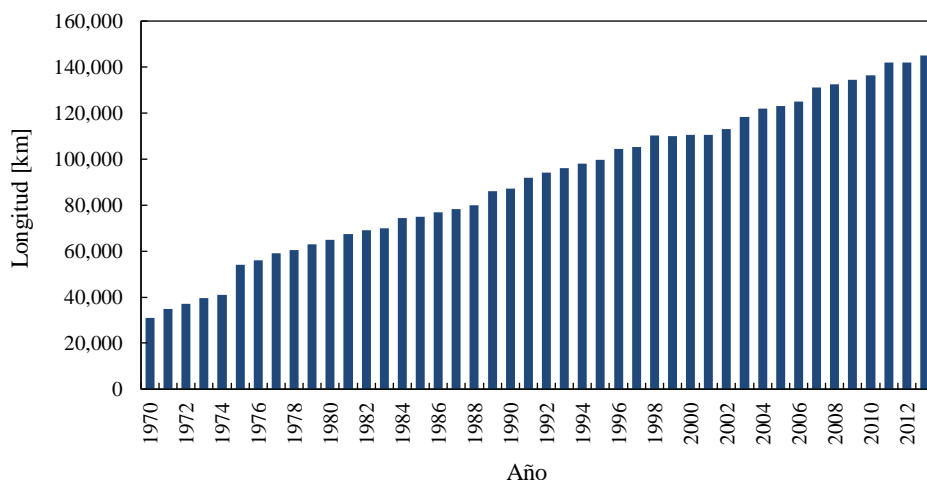


Fig. I-1. Longitud total de la red de tuberías de transporte de gas en Europa (EGIG, 2015).

Cuando se transporta un fluido peligroso, las tuberías son un sistema relativamente seguro comparado con otros modos de transporte, como el

transporte por carretera o ferrocarril. Comparando las diversas posibilidades de transporte, Boot (2013) hizo hincapié en los siguientes puntos:

- El transporte por ferrocarril, carretera y barco son modos por lotes, mientras que la tubería tiene un carácter continuo.
- Los sistemas por lotes implican actividades de carga y descarga, lo que supone una importante contribución del factor humano. Al analizar los accidentes graves (tanto en plantas fijas como en el transporte), se encontró que el 8-10% se han producido durante las operaciones de carga y descarga (Vílchez et al., 1995).
- En el transporte por lotes, la frecuencia de fallo incluye la probabilidad de que el vagón, camión o barco esté presente. La tubería tiene un factor de presencia del 100%.

Boot (2013) presentó un análisis comparativo sobre el transporte de 100.000 t/año de gas propano por los diferentes modos de transporte, basado en el análisis cuantitativo del riesgo asociado. Se tomó en cuenta el número de transportes necesario para los modos de ferrocarril, carretera y barco, y se consideró un diámetro de 65 mm para la tubería. Los resultados mostraron que el transporte por tubería era más peligroso que los otros modos cuando se tuvieron en cuenta los accidentes con consecuencias reducidas, pero era significativamente más seguro para los accidentes más graves, siendo en promedio menos peligroso que los otros modos.

Otro estudio comparativo fue realizado por el Consejo de Investigación del Transporte de los Estados Unidos (U.S. Transportation Research Board [TRB], 2004), teniendo en cuenta la tasa de muertos y heridos por tonelada-milla. El resultado mostró que el transporte por tubería era en general el sistema más seguro (solamente el buque tanque y la barcaza eran más seguros en términos de lesiones por tonelada-milla).

2. Motivación

A pesar de que los estudios muestran que el transporte por tuberías es un sistema relativamente seguro, es un hecho que, debido al continuo aumento de la extensión de su red, los accidentes ocurren con consecuencias graves sobre las personas y el ambiente. De hecho, una serie de accidentes recientes, como el

ocurrido en Ghislenghien, Bélgica el 30 de julio de 2004, donde la rotura de una tubería de gas natural de alta presión, dañada previamente por una máquina excavadora, y el gran incendio posterior causó 23 muertes y alrededor de 150 hospitalizados (Analysis, Research and Information on Accidents [ARIA], 2009), o la rotura de una tubería de petróleo ocurrida en Marshall, Michigan en 2010 (National Transportation Safety Board [NTSB], 2012), que derivó en el derrame de 4.200 m³ sobre el río Kalamazoo, confirman esta preocupación.

Por lo tanto, teniendo en cuenta la gran longitud de tuberías en muchos países, con la consecuente interacción con el territorio, y la enorme cantidad de materiales peligrosos transportados todos los días, la ocurrencia de un accidente no debe pasarse por alto. Esta tesis se centra en analizar los principales aspectos de los accidentes de tuberías ocurridos en el pasado (tipos, frecuencia, causas, efecto dominó, etc.), para ilustrar el riesgo asociado a estos sistemas y contribuir a mejorar la seguridad de las tuberías y, por consiguiente, de sus alrededores.

3. Objetivos

Con los antecedentes expuestos, en esta tesis se plantearon los siguientes objetivos.

Objetivo general

Contribuir al análisis cuantitativo del riesgo en el transporte de materiales peligrosos por tuberías terrestres.

Objetivos específicos

En particular, los objetivos de esta tesis se pueden resumir en los siguientes puntos:

1. Realizar un análisis histórico de accidentes en tuberías para identificar sus principales características, así como sus consecuencias sobre las personas y el medio ambiente.
2. Desarrollar árboles de eventos para las diferentes sustancias involucradas en los accidentes en tuberías.
3. Estimar las probabilidades condicionales de ocurrencia de los diferentes eventos identificados en el análisis histórico.

4. Identificar, mediante un análisis histórico de las roturas de tuberías de gas natural que han implicado la formación de un cráter, los parámetros de la tubería que determinan las dimensiones del cráter formado, así como la probabilidad de efecto dominó en tuberías paralelas.
5. Desarrollar un modelo matemático, basado en el estudio histórico de accidentes dominó, para estimar la probabilidad de efecto dominó en tuberías paralelas, asociada a los efectos térmicos y la erosión de un chorro de fluido.

4. Aportaciones originales de la tesis

Los principales aportes de esta tesis al campo del conocimiento y, particularmente, a la teoría del análisis del riesgo son los siguientes:

- Una base de datos con 1.063 accidentes e incidentes que han ocurrido en diversos países en relación con el transporte de materiales peligrosos por tuberías en tierra. Período 1980-2015.
- Estadísticas sobre las principales características de estos accidentes (tipos, causas, materiales involucrados, consecuencias, etc.).
- Árboles de eventos detallados para las diferentes clases de materiales peligrosos identificados: gases comprimidos, gases licuados a presión, líquidos volátiles y líquidos con baja volatilidad.
- Tablas de probabilidades condicionales de los diferentes eventos que pueden ocurrir tras la pérdida de contención accidental de materiales peligrosos de las tuberías.
- Base de datos de accidentes de tuberías enterradas de gas natural que han involucrado la formación de un cráter.
- Análisis del efecto de los parámetros de la tubería que determinan el potencial energético de una rotura explosiva sobre las dimensiones del cráter resultante.
- Árbol de eventos de las secuencias de efecto dominó tras la formación de un cráter por la rotura de una tubería enterrada de gas natural.
- Base de datos de accidentes con efecto dominó en tuberías paralelas y cruzadas, asociado a la erosión por chorros de fluido-arena y a la acción térmica de dardos de fuego. Período 2003-2012.

- Un modelo matemático para estimar la probabilidad de efecto dominó en tuberías paralelas, aéreas o enterradas, asociada a un chorro de fluido y a la erosión o a los efectos térmicos resultantes.

5. Publicaciones

El trabajo de investigación desarrollado en el ámbito de esta tesis ha dado como resultado la publicación de varios artículos en revistas científicas y comunicaciones en congresos. A continuación se detallan estas contribuciones.

Artículos

- **Ramírez-Camacho, J. G.**, Carbone, F., Pastor, E., Bubbico, R., & Casal, J. (2017). Assessing the consequences of pipeline accidents to support land-use planning. *Safety Science*, 97, 34–42.
- Bubbico, R., Carbone, F., **Ramírez-Camacho, J. G.**, Pastor, E., & Casal, J. (2016). Conditional probabilities of post-release events for hazardous materials pipelines. *Process Safety and Environmental Protection*, 104, 95–110.
- **Ramírez-Camacho, J. G.**, Pastor, E., Casal, J., Amaya-Gómez, R., & Muñoz-Giraldo, F. (2015). Analysis of domino effect in pipelines. *Journal of Hazardous Materials*, 298, 210–220.

Comunicaciones en congresos

- **Ramírez-Camacho, J. G.**, Pastor, E., & Casal, J. *Formación de cráteres por la rotura de tuberías enterradas de gas natural*. En 2º Foro Internacional de Talento Mexicano Innovation Match Mx 2016-2017. Ciudad de México, México, 31 de Mayo, 1 y 2 de Junio 2017.
- **Ramírez-Camacho, J. G.**, Carbone, F., Pastor, E., Amaya-Gómez, R., Muñoz-Giraldo, F., Bubbico, R., & Casal, J. *Análisis histórico de accidentes de tuberías y estimación de la probabilidad de fallo basada en el efecto dominó*. En 1er Foro Internacional de Talento Mexicano Innovation Match Mx 2015-2016. Guadalajara, México, Abril 2016.

6. Estructura de la tesis

La estructura de la tesis es la siguiente:

El Capítulo 1 introduce en la teoría básica del transporte de materiales peligrosos por tubería y al análisis del riesgo. Se presentan brevemente los tipos de accidentes graves que pueden ocurrir en esta modalidad de transporte y sus consecuencias. También se describen los componentes de un sistema de tuberías para el transporte y distribución de hidrocarburos, así como las etapas de diseño, construcción y operación de las tuberías. También se abordan aspectos fundamentales del análisis del riesgo y el efecto dominó.

El Capítulo 2 presenta un estudio histórico de una muestra de 1.063 accidentes que han ocurrido en tuberías terrestres, con un análisis estadístico de sus principales características, para ilustrar el riesgo asociado a estos sistemas y su importancia en la planificación del uso del suelo. Se cree que un análisis histórico preciso de una muestra de accidentes lo más grande posible puede proporcionar información interesante y útil sobre sus modalidades y consecuencias, permitiendo identificar las medidas preventivas apropiadas. La mayoría de los resultados que se presentan en este capítulo han sido publicados en un número especial de la revista *Safety Science*, volumen 97, páginas 34-42, dedicado a la planificación del uso del territorio (véase el Apéndice A).

A continuación, el Capítulo 3 realiza un análisis más detallado de los datos históricos recopilados en el capítulo anterior para estimar las probabilidades condicionales de los diferentes eventos que pueden ocurrir tras la liberación accidental de materiales peligrosos de las tuberías. Asimismo, se desarrollan árboles de eventos detallados para las diferentes clases de materiales peligrosos y se identifica, para cada tipo de pérdida de contención, la relación entre los eventos finales y las causas de fallo de la tubería. Los resultados que se presentan en este capítulo han sido publicados en la revista *Process Safety and Environmental Protection*, volumen 104, páginas 95-110 (véase el Apéndice B).

El Capítulo 4 se analiza uno de los posibles eventos que pueden ocurrir en tuberías enterradas de gas natural y que pueden conducir a un efecto dominó: la formación de un cráter por la rotura de una tubería de alta presión. Este evento ha sido poco estudiado, pero es relevante debido a su potencial destructivo,

Introducción

especialmente cuando ocurre cerca de otras tuberías o en las proximidades de áreas donde las consecuencias pueden ser significativas. Los datos se recopilaron mediante un análisis de accidentes ocurridos en el pasado. Se identifican los parámetros de la tubería que determinan las dimensiones del cráter. También se evalúan las posibles secuencias dominó tras la formación de un cráter y se calculan las probabilidades condicionales para estos casos.

El Capítulo 5 presenta un nuevo enfoque para la evaluación del efecto dominó en tuberías. Con base en un estudio histórico de los accidentes de tuberías y las diversas secuencias dominó relacionadas, se propone un modelo matemático para estimar la probabilidad de efecto dominó en tuberías paralelas, aéreas o enterradas, asociada a un chorro de fluido y a la erosión o a los efectos térmicos resultantes. La probabilidad de ocurrencia de efecto dominó es una función de la ubicación del orificio, la dirección del chorro y el ángulo sólido, el diámetro de ambas tuberías y la distancia entre ellas. El modelo muestra cómo la probabilidad de efecto dominó disminuye con la distancia y el diámetro de la tubería fuentes, y aumenta con el diámetro de la tubería objetivo. Los resultados que se presentan en este capítulo han sido publicados en la revista *Journal of Hazardous Materials*, volumen 298, páginas 210-220 (véase el Apéndice C).

Por último, el Capítulo 6 presenta las conclusiones finales de este trabajo.

SISTEMAS DE TRANSPORTE POR TUBERÍA Y ANÁLISIS DE RIESGOS

1.1. Componentes de un sistema de tuberías

Los componentes de un sistema de tuberías de larga distancia incluyen secciones de tuberías meticulosamente soldadas e instalaciones adicionales, tales como estaciones de compresión/bombeo, equipos de medición y regulación de presión, válvulas de bloqueo, tanques de almacenamiento y otros elementos especiales. A continuación, se presenta una breve descripción de los principales componentes de un sistema de tuberías.

1.1.1. Tuberías

Las tuberías sirven para transportar un amplio rango de materiales y suelen ser la mejor forma de trasladar grandes volúmenes de líquidos o gases a largas distancias. Conectan los diferentes equipos que integran el sistema. Son diseñadas en función del tipo y carácter del fluido a transportar, especialmente de su corrosividad, régimen de flujo, temperatura y presión, por lo que la selección del material de la tubería es una cuestión fundamental en la etapa de diseño del sistema (Bahadori, 2016).

El material más frecuentemente utilizado en la elaboración de tuberías es el acero al carbono (Stewart, 2016), debido a su resistencia y durabilidad, y se puede operar a altas presiones (Ozzane, 2011a). Aunque las tuberías se diseñan y fabrican para resistir mucha más presión de la que realmente podría alcanzar el

sistema, cuanto mayor sea la presión en el interior de la tubería más grave puede ser un accidente (Pharris y Kolpa, 2007). Además del material, el diseño de las tuberías está determinado por el diámetro y el espesor de la pared. A mayor diámetro de la tubería, mayor será la capacidad de transporte del sistema.

La fabricación de las tuberías se basa en códigos y normas como los desarrollados por el American Petroleum Institute o API, la American Society of Mechanical Engineers o ASME, y la American Society for Testing Materials o ASTM, entre otros estándares. En cualquier caso, las tuberías deben cumplir como mínimo los requisitos de resistencia mecánica, resistencia química y resistencia térmica (Stewart, 2016). Una mala elección del material o el incumplimiento de las condiciones de operación pueden resultar en la rotura de la tubería, corrosión, grietas o en un costo excesivo de inversión, reparación y/o mantenimiento. Eventualmente, estas situaciones pueden derivar en un incendio, en la liberación de productos tóxicos o corrosivos, contaminación, con consecuencias como lesiones o la muerte, tal como se discute más adelante.

a) Tipos de tuberías y fluidos transportados

Las tuberías se pueden clasificar según el tipo de fluido transportado en tuberías de petróleo o hidrocarburos (también conocidas como tuberías de líquidos peligrosos) y tuberías de gas natural (GN). Ambos tipos de tuberías forman extensas y complejas redes, cuya finalidad es el transporte eficiente y eficaz de los productos.

La Fig. 1-1 muestra una configuración típica de un sistema de tuberías de petróleo. Estas tuberías van desde las zonas de producción, pasando por refinerías, hasta las instalaciones de almacenamiento cerca de los consumidores para su distribución (Pharris y Kolpa, 2007). Transportan diferentes hidrocarburos líquidos que incluyen crudo, bitumen diluido, productos refinados del petróleo y líquidos del gas natural (LGN) como el etano, el butano y el propano, los cuales son gases a temperatura y presión estándar pero fácilmente licuados mediante la aplicación de presión. Los productos refinados del petróleo incluyen la gasolina, combustible para aviones, gasóleo, queroseno y otros combustibles, los cuales son transportados desde las refinerías a grandes terminales de almacenamiento. Posteriormente, las terminales cargan los combustibles en camiones cisterna y los transportan a las estaciones de servicio;

las grandes instalaciones industriales, así como los aeropuertos y las plantas eléctricas, son suministradas directamente por tubería.

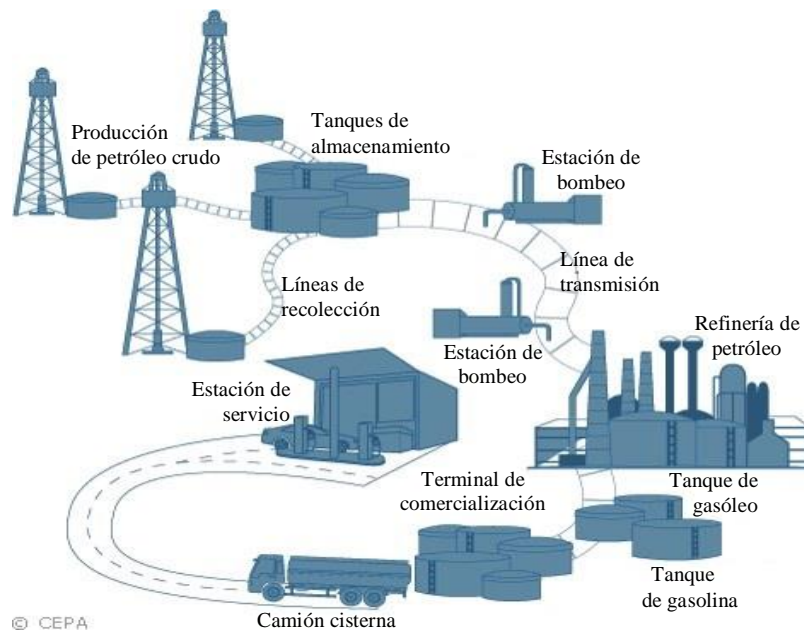


Fig. 1-1. Configuración típica de un sistema de tuberías de transporte de petróleo crudo (Foto cortesía de Canadian Energy Pipeline Association).

Otros materiales líquidos transportados por tubería incluyen materias primas petroquímicas, tales como benceno, estireno, propileno y productos aromáticos como xileno, tolueno y cumeno, que son suministrados desde las refinerías a plantas de producción petroquímica o a otras refinerías. El dióxido de carbono se transporta también por tuberías en estado líquido en condiciones de alta presión, desde los sitios donde se captura hasta su lugar de almacenamiento; se utiliza para la recuperación mejorada de petróleo, principalmente en los Estados Unidos (Joshi et al., 2016). El hidrógeno se suministra igualmente por tuberías que recorren distancias relativamente cortas, conectando las instalaciones de producción de hidrógeno con las refinerías y otras industrias que lo utilizan como material de base en sus procesos.

A diferencia de las tuberías de petróleo, las tuberías de GN se distribuyen de una manera algo diferente (Fig. 1-2). Se extienden desde las zonas de extracción del gas hasta las instalaciones de procesamiento y se utilizan asimismo para distribuirlo directamente hasta el consumidor final (Folga, 2007).

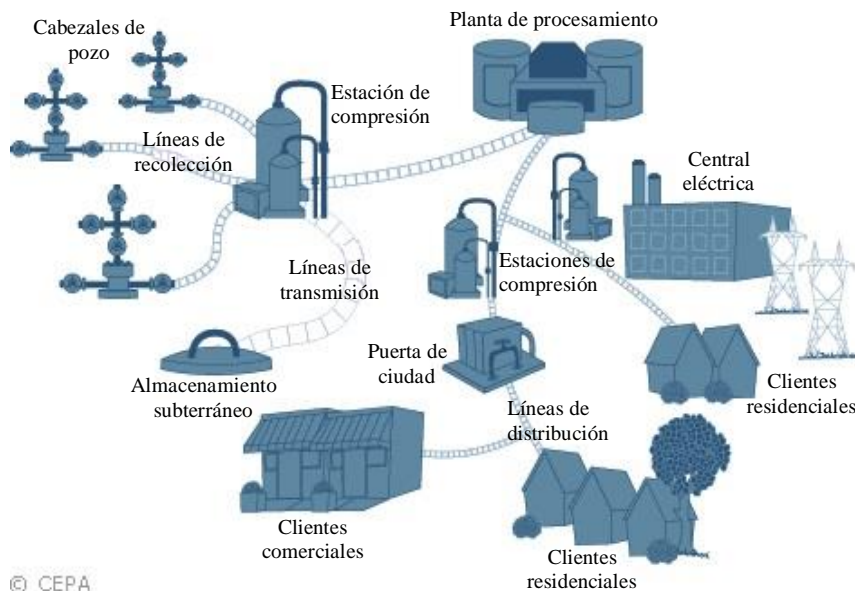


Fig. 1-2. Configuración típica de un sistema de tuberías de transporte de gas natural (Foto cortesía de Canadian Energy Pipeline Association).

Dependiendo de su función, las tuberías de petróleo y de GN se subdividen en tres categorías: líneas de recolección, líneas de transmisión y líneas de distribución.

A. Líneas de recolección

Estas tuberías recorren cortas distancias, desde los pozos de extracción a instalaciones de almacenamiento o de procesamiento. Recogen el petróleo crudo, el bitumen diluido (siempre que haya sido diluido *in-situ*), el GN y otros gases licuados, y los transportan a relativamente bajas presiones (hasta 55 bares, dependiendo de la sustancia). Son fabricadas en acero y su diámetro es variable, pudiendo tener más de 24 pulgadas en algunos casos (API, 2013).

B. Líneas de transmisión

También llamadas líneas troncales o principales, son tuberías de acero de gran tamaño que pueden medir desde 6 hasta 48 pulgadas de diámetro, cuya presión de funcionamiento varía típicamente de 14 a 100 bares dependiendo del fluido transportado (Folga, 2007). Se extienden desde las instalaciones de procesamiento hasta centros de almacenamiento en el caso de líquidos, o a una

puerta de ciudad o *city gate* en el caso del GN. Recorren largas distancias, cruzando fronteras internacionales.

Este tipo de tuberías se utiliza también para transportar una variedad de productos refinados del petróleo. En este caso, el transporte se realiza por lotes en la misma tubería. Por ejemplo, el operador puede enviar gasolina por varias horas, luego enviar combustible para aviones y finalmente gasóleo. Para esto, los productos deben ser químicamente compatibles, pero pueden diferir en sus propiedades físicas, como la densidad. Sin embargo, esta situación deriva en un aumento en el número de instalaciones de apoyo (*e.g.*, tanques de almacenamiento) para recibir y segregar los diferentes productos.

C. Líneas de distribución

Las tuberías de distribución se utilizan para suministrar el GN directamente al consumidor final (hogares, negocios y algunas industrias). Su diámetro varía de 2 a 24 pulgadas y, como medida de seguridad, operan por debajo de su presión de diseño (desde tan solo 0,02 hasta 14 bares) con dispositivos reguladores que controlan la presión (Speight, 2007). Contrariamente a las líneas de transmisión, algunas tuberías de distribución están fabricadas de una variedad de materiales, tales como plástico con la debida resistencia (*e.g.*, el policloruro de polivinilo o PVC), debido a la necesidad de flexibilidad, versatilidad y facilidad de reemplazo, además de ser resistentes a la corrosión (Stewart, 2016).

1.1.2. Tanques de almacenamiento

Los tanques de almacenamiento son instalaciones de apoyo que sirven para el almacenamiento temporal y para recibir los diversos productos enviados por las tuberías, así como para facilitar los movimientos de los productos. Estas infraestructuras se encuentran tanto al inicio como al final de los sistemas de tuberías y pueden estar a nivel del suelo o enterrados, pero generalmente predominan los tanques sobre el suelo. Además, pueden estar adyacentes a un corredor centralizado, pero no necesariamente dentro de los derechos de paso de la tubería (Pharris y Kolpa, 2007).

El tamaño y naturaleza del almacenamiento dependen del operador de la tubería y de los productos transportados. Algunos ejemplos son tanques con techo flotante abierto o cubierto, tanques esféricos (típicamente utilizados para

almacenar gases a alta presión) o tanques cilíndricos (típicamente utilizados para gases almacenados a altas presiones, con frecuencia en estado licuado). El Instituto Americano del Petróleo (API, por sus siglas en inglés), entre otras instituciones, ha desarrollado normas para el diseño y construcción de este tipo de instalaciones (API, 2016). Estas consideraciones de diseño y operación incorporadas a las normas de la industria, junto con las regulaciones ambientales, tienen por objetivo proporcionar una operación segura de los sistemas de tuberías, pues contemplan la instalación de sistemas de seguridad en los tanques de almacenamiento tales como diques de contención, sistemas de drenaje cerrados y sistemas de monitorio y de detección de fugas, entre otros.

En el caso del GN, este se almacena a más de 1.000 metros de profundidad en depósitos agotados de gas o petróleo, o en acuíferos salinos conocidos por sus propiedades no porosas e impermeables (Wang y Economides, 2009). El gas inyectado desplaza el agua que rellena los poros de la roca y cuando se extrae el agua vuelve a rellenar estos poros. Esta modalidad de almacenamiento está creciendo actualmente y se utiliza para almacenar gas en épocas de menor demanda (verano) y se extrae cuando existe una mayor demanda de gas (invierno), impidiendo las interrupciones del suministro a los grandes usuarios (Llamas-Moya, 2009).

1.1.3. Estaciones de bombeo

Las estaciones de bombeo se utilizan en las tuberías de petróleo o hidrocarburos líquidos. Requieren también de infraestructura propia y pueden estar localizadas dentro del derecho de vía de una tubería. Las bombas son impulsadas normalmente por motores eléctricos, pero también suelen utilizarse motores que funcionan a base de combustibles. Dependiendo de la ubicación de la estación de bombeo, la potencia puede ser un problema. En el caso de cortes de energía u otras condiciones de emergencia significativas, las estaciones de bombeo disponen de suficiente generación de energía de emergencia para mantener en funcionamiento los sistemas de monitoreo/control y lograr así una parada inmediata y segura del sistema (Pharris y Kolpa, 2007). Estas instalaciones también se utilizan para el manejo e inyección de aditivos, por ejemplo, para reducir la viscosidad del líquido transportado.

1.1.4. Estaciones de compresión

Las estaciones de compresión se utilizan en los sistemas de GN. Se instalan a lo largo de las tuberías de transmisión (generalmente a intervalos de 60 a 160 kilómetros) para asegurar un flujo uniforme a lo largo de toda la línea (alrededor de 40 km/h) (Folga, 2007). Comprimen el GN (hasta 600 veces) a medida que viaja a través de la tubería, utilizando altas presiones (Mokhatab et al., 2015). Las ubicaciones óptimas y las presiones de operación de las estaciones de compresión se determinan en función del caudal de la tubería, de las presiones de operación admisibles por la tubería, y de la topografía que atraviesa la tubería (Menon, 2011a).

Por otra parte, suelen estar equipadas con separadores de líquidos, que depuran y filtran cualquier líquido o partículas indeseables del GN en la tubería, que pudieran haber quedado después del proceso de deshidratación del gas. Otros equipos importantes instalados incluyen refrigeradores aéreos de gas y sistemas de control para monitorear el funcionamiento y los parámetros de operación de la estación, entre otros (Folga, 2007).

1.1.5. Estaciones de medición

Las estaciones de medición se colocan periódicamente a lo largo de las tuberías principales –adyacentes del derecho de paso de la tubería– y en cada uno de los puntos de recepción e interconexión del sistema (Folga, 2007). Su función principal es administrar, medir y monitorear la calidad y consistencia del producto que se envía para ser entregado al cliente. Las mediciones se realizan utilizando medidores de masa y medidores de flujo volumétrico especializados, que miden el producto a medida que fluye por la tubería sin impedir su movimiento (Pharris y Kolpa, 2007). Un medidor de masa mide el caudal en unidades de libras o kg, mientras que un medidor de flujo volumétrico –que es el que se utiliza con mayor frecuencia– lo mide en unidades volumétricas, tales como barriles, galones o m³. Para asegurar la exactitud de las cantidades de flujo medidas, la precisión de las mediciones debe comprobarse periódicamente.

Las mediciones sirven para realizar controles de balance de masa o volumen en secciones específicas de la red y, de esta manera, verificar la integridad de la tubería; cualquier discrepancia podría indicar algún tipo de pérdida de

contención. Sin embargo, existe una cierta «reducción» en el volumen cuando el producto es transferido de la tubería a los tanques de almacenamiento y a otras tuberías, por lo que debe determinarse si la reducción observada está dentro de los valores esperados (Pharris y Kolpa, 2007).

1.1.6. Estaciones de distribución para zonas urbanas

Denominadas puertas de ciudad o *city gate stations*, son la primera instalación de un sistema de distribución de GN a zonas urbanas. Su función principal es recibir el gas a alta presión de las tuberías de transmisión, medirlo, reducir la presión con dispositivos reguladores y, finalmente, transportarlo a la presión deseada por tuberías de distribución hasta los clientes finales (Folga, 2007). El GN que se recibe en estas estaciones puede o no tener olor, por lo que, en caso de presentar olor insuficiente o nulo, se le agrega un odorante distintivo (habitualmente mercaptano) antes de que el gas salga de la estación. El mercaptano es una sustancia inofensiva y no tóxica que facilita la detección de una fuga de gas antes de que pueda crearse una situación peligrosa (Díaz, 2015).

1.1.7. Estaciones de limpieza

Estas estaciones sirven para el lanzamiento y recepción de dispositivos para el mantenimiento e inspección interna de las tuberías (*Pipeline Inspection Gauge* o PIG) (Stewart, 2016). Las labores de mantenimiento implican la limpieza interna de la tubería para eliminar lodos y otras incrustaciones de las paredes. Las acciones de inspección involucran el monitoreo y la comprobación de la integridad de la tubería mediante señales ultrasónicas para detectar grietas, cambios en el espesor de la pared y defectos de fabricación. Suelen utilizarse mayormente en tuberías de líquidos que de gases, debido a que la señal ultrasónica en una tubería de gas no se desplaza eficientemente.

También conocidos como *pigs* inteligentes, estos dispositivos pueden utilizarse de manera rutinaria, dependiendo de la naturaleza y calidad (pureza) de los fluidos transportados y de la antigüedad de la tubería, sin interrumpir las operaciones del sistema. Se introducen en las instalaciones de lanzamiento situadas a lo largo del derecho de vía de las tuberías principales, con frecuencia localizadas junto a una estación de bombeo. El diámetro externo de estos dispositivos puede ser igual o ligeramente mayor al diámetro interno de la

tubería, de tal manera que una parte del *pig* se comprime cuando se coloca en su interior y es llevado a través de la tubería por el flujo del líquido. Posteriormente estos dispositivos se retiran en las estaciones de recepción antes de llegar a la siguiente estación de bombeo. Los datos registrados por estos dispositivos se integran normalmente con los datos del sistema SCADA (véase la Sección 1.1.10) y se usan para controlar las actividades de inspección, mantenimiento y reparación de las tuberías.

1.1.8. Válvulas

Las tuberías requieren de un gran número de válvulas situadas a lo largo de su trayectoria, al igual que las instalaciones de apoyo necesarias para la operación del sistema. Suelen colocarse cada 8 a 32 kilómetros a lo largo de la tubería y pueden estar instaladas por encima del suelo o enterradas (Folga, 2007).

Existe una gran variedad de diseños de válvulas fabricadas para realizar una serie de funciones específicas; además, están sujetas a regulaciones de seguridad (Stewart, 2016). Un ejemplo son las válvulas de bloqueo, que permiten controlar o interrumpir el flujo. Por lo general, este tipo de válvulas se encuentran abiertas en las tuberías para permitir el flujo de líquidos y GN hasta su destino final, mientras que en las conexiones de ramificación de las tuberías pueden estar abiertas o cerradas, dependiendo de las órdenes de envío. Sirven también como medida de protección, pues permiten aislar una parte de la tubería en caso de pérdida de contención, daño o rotura (Barry y Bubar, 2011). Otro tipo de válvulas utilizadas son las válvulas anti-retorno o válvulas *check*, que permiten controlar la presión en caso de sobrepresión o evitar el retroceso del producto en las pendientes en caso de pérdida de potencia en las estaciones de bombeo.

El funcionamiento satisfactorio de cualquier sistema de tuberías depende en gran medida de la selección y localización apropiadas de las válvulas que controlan y regulan el flujo de fluidos al equipo conectado (Stewart, 2016). Esta situación constituye una cuestión crítica en el proceso de diseño y operación de un sistema de tuberías (Bahadori, 2016). Resulta necesario asegurar el aislamiento de segmentos discretos de la tubería en caso de afectaciones o situaciones de emergencia, así en caso de trabajos de reparación o mantenimiento, pues todas las válvulas –independientemente de su diseño– requieren de supervisión continua y de mantenimiento regular (Pharris y Kolpa, 2007; Stewart, 2016).

1.1.9. Sistemas de control de la corrosión

Debido a que las tuberías están compuestas principalmente de acero, el control de la corrosión es fundamental para la integridad del sistema. La corrosión puede afectar eventualmente tanto a tuberías aéreas como enterradas, especialmente si no están correctamente protegidas o si no se conservan adecuadamente. Sin embargo, es más frecuente en tuberías enterradas debido a las condiciones del medio que las rodea. En cualquier caso, la corrosión podría resultar en una reducción del espesor de la pared de la tubería, debilitando su integridad estructural y haciéndola insegura para el transporte de líquidos y gases (Menon, 2011b). De hecho, se han registrado diversos accidentes en tuberías debido a la corrosión (Siler-Evans et al., 2014).

La corrosión se puede controlar a través de diferentes medidas de protección que proporcionan la separación de las superficies metálicas de ambientes corrosivos o de aquellos elementos que alteran los ambientes. La medida más comúnmente utilizada para prevenir la corrosión es la aplicación de recubrimientos (pinturas protectoras, revestimiento exterior e interior, etc.) en la tubería antes de enterrarla y evitar así su participación en reacciones electroquímicas (Pharris y Kolpa, 2007). Se debe preparar la superficie de la tubería antes de aplicar cualquier recubrimiento, es decir, se deben eliminar todos los contaminantes superficiales del acero para asegurar una adecuada adherencia del material de recubrimiento (Folga, 2007). Esta etapa se considera generalmente como la más importante para el éxito de un sistema de protección contra la corrosión (Bahadori, 2015).

Otra medida utilizada es la protección catódica, en la que básicamente la tubería enterrada actúa como cátodo y otro metal actúa como ánodo de sacrificio, el cual se corroe por el proceso electroquímico en lugar del acero de la tubería. En otros casos se utilizan inhibidores para modificar los ambientes y proveer un medio versátil para reducir la corrosión. Un inhibidor es una sustancia química que permite disminuir las tasas de corrosión considerablemente.

1.1.10. Sistema SCADA

El sistema SCADA (en inglés, Supervisory Control and Data Acquisition) es una aplicación de software para ordenadores diseñada para controlar y supervisar las distintas variables que intervienen en un proceso local o remoto. Permite la

comunicación en tiempo real entre los dispositivos de campo, conocidos como RTU (Unidad Terminal Remota), y el centro de control (Unidad Terminal Maestra o MTU) desde donde se controla todo el proceso (Rodríguez, 2011). Un sistema SCADA incluye tradicionalmente equipos como torres de telecomunicación y cableado, para la transferencia de información a las diversas instalaciones a lo largo de la tubería.

En el caso de un sistema de tuberías se utiliza para regular la presión y el flujo mediante el monitoreo y control del funcionamiento de la bomba/compresor y las posiciones de las válvulas. Otras utilidades de este sistema son la detección de fugas, el procesamiento de alarmas, el análisis de rendimiento del sistema y otras funciones adicionales consideradas cruciales para la operación segura de un sistema de tuberías (Ozzane, 2011b).

1.2. Diseño, construcción y operación de tuberías

El desarrollo de un proyecto de tuberías se caracteriza por tres etapas sucesivas: diseño, construcción y operación. Durante estas etapas se deben considerar muchos factores, pues una vez instalada la tubería la flexibilidad de realizar algún cambio en los puntos de entrada o salida es limitada (Stewart, 2016). A continuación, se presenta una breve descripción de cada una de estas etapas.

1.2.1. Diseño de tuberías

Esta etapa se divide en tres fases (Stewart, 2016):

- *Diseño preliminar*: esta fase está limitada a la configuración del sistema, las necesidades de capacidad, el cálculo del diámetro y espesor de la tubería, la selección del material y de la protección contra la corrosión. Aquí también se realiza un estudio de factibilidad para determinar la viabilidad técnica del proyecto prospectivo. Los aspectos a evaluar son las limitaciones físicas, técnicas y regulatorias, así como las técnicas de instalación y los recursos requeridos, las áreas problemáticas potenciales, las estimaciones de capital y los costos operativos, entre otros.
- *Diseño conceptual*: en esta fase se elabora una estimación más detallada de los costos de inversión en materiales, construcción, operación y mantenimiento del sistema.

- *Diseño detallado*: esta fase comienza una vez que la inversión ha sido aprobada. El diseño detallado incluye la selección de la ruta y prospección, estudios de geología y suelo, estudios de riesgo y de impacto ambiental, la selección de materiales y del recubrimiento de la tubería, el diseño mecánico de la tubería (diámetro y espesor), un análisis hidráulico, tamaño y espaciamiento de las instalaciones de bombeo/compresión, entre otros factores (Pharris y Kolpa, 2007). Se debe realizar una evaluación minuciosa tanto de la ruta propuesta como del derecho de paso y del entorno natural circundante, con el fin de identificar las características únicas (infraestructura, poblaciones, ecosistemas, etc.) que deben protegerse a lo largo de la vida de la tubería (Ozzane, 2011c).

1.2.2. Construcción de tuberías

La construcción de un sistema de tuberías en tierra es una obra compleja que requiere de una gran inversión, pues se extienden a lo largo de muchos kilómetros atravesando diferentes zonas geográficas como montañas, ríos o zonas forestales, y deben ser capaces de soportar las variaciones estacionales de temperatura y clima (Interstate Natural Gas Association of America [INGAA], 2013). El costo de construcción es proporcional a la distancia que recorren, pero los gastos de mantenimiento suelen ser relativamente bajos. Esta etapa puede comenzar únicamente después de que se ha seleccionado la ruta, se han negociado los derechos de paso y obtenido los permisos ambientales, así como muchas otras acciones necesarias previas a la construcción.

La construcción de las tuberías se suele llevar a cabo en las épocas del año que ofrecen las condiciones climáticas más adecuadas (Pharris y Kolpa, 2007). Por ejemplo, en las zonas que están permanentemente húmedas las tuberías se suelen instalar durante el invierno cuando el suelo está congelado. Las tuberías que requieren cruzar por tierras de cultivo también suelen instalarse durante el invierno, para no interferir en las actividades agrícolas. Los métodos de construcción dependen de las características del terreno, la ubicación geográfica y el medio ambiente.

Las tuberías pueden instalarse bajo tierra, mientras que otros componentes como estaciones de bombeo/compresión se sitúan sobre el suelo. De hecho, la mayoría

de las tuberías se instalan bajo tierra, a una profundidad que varía dependiendo de la geografía local a lo largo de la ruta del sistema (Folga, 2007). La Tabla 1-1 muestra los requisitos de profundidad para los diferentes tipos de tuberías en suelos relativamente suaves. En los casos en que se requiera una mayor profundidad (*e.g.*, cruces de cuerpos de agua, campos agrícolas y otras situaciones que lo justifiquen), las tuberías se suelen instalar entre 1,2 y 1,5 metros por debajo del suelo.

Tabla 1-1. Cobertura mínima para tuberías enterradas (ASME, 2002, 2004).

Ubicación de la ruta	Para excavación normal (m)
<i>Tuberías de recolección</i> ^(a) <i>y de transmisión</i> ^(b)	
Áreas industriales, comerciales y residenciales	0,9
Cruces de ríos y arroyos	1,2
Zanjas de drenaje en carreteras y caminos	0,9
Otras áreas	0,75
<i>Líneas de distribución</i>	
Áreas industriales, comerciales y residenciales	0,6
Caminos y calles	0,45
Propiedad privada	0,3

^(a) Cobertura mínima en zonas de roca consolidada: 0,3 m; en cualquier otra área: 0,6 m.

^(b) Cobertura mínima en zonas de roca consolidada: 0,6 m en áreas industriales, comerciales y residenciales, así como en zanjas de drenaje en carreteras y caminos; en cruces de ríos/arroyos y en cualquier otra área: 0,45 m.

Por otra parte, la etapa de construcción también conlleva las siguientes actividades (Stewart, 2016): limpieza del derecho de paso, remoción de las capas superiores del suelo, excavación de zanjas y despeje de rocas, tendido y curvado de las tuberías, soldadura e inspección, revestimiento de la tubería, colocación de la tubería en la zanja, relleno y limpieza, así como otras consideraciones especiales de construcción (cruces de agua, carreteras, interferencias de servicios público enterrados o no, etc.). Una vez instaladas, se realizan pruebas hidrostáticas y ensayos previos a la puesta en marcha. Finalmente, las tuberías y las instalaciones asociadas se señalan con marcadores en la superficie para reducir la posibilidad de errores y accidentes (Wininger, 2011).

1.2.3. Operación de tuberías

Esta etapa se inicia con la puesta en servicio del sistema, lo cual es posible una vez que las tuberías se encuentran conectadas desde el origen de la instalación

(yacimientos) hasta los puntos de entrega finales. La operación de las tuberías implica la evaluación rutinaria de su condición física e integridad, con el fin de garantizar el funcionamiento seguro y confiable (Folga, 2007). La integridad de la tubería se determina a través de métodos de inspección directa y mediante el uso de herramientas de inspección interna.

Los métodos de evaluación directa implican la inspección visual y física de la tubería (Ozzane, 2011d). Los elementos que se inspeccionan son la protección catódica, el revestimiento, etc., para lo cual se seleccionan segmentos de la tubería y se examinan detalladamente. La evaluación directa suele hacerse también cuando se remueven secciones de la tubería por cualquier motivo, en actividades de reubicación e instalación de accesorios, etc. El derecho de paso de la tubería también se inspecciona periódicamente, ya sea a través de recorridos por tierra o aéreos. El objetivo es detectar cualquier decoloración en la vegetación (lo que podría indicar algún tipo de fuga), así como para localizar actividades inusuales en la zona que pudieran afectar la seguridad de la tubería (Pharris y Kolpa, 2007).

Las inspecciones internas de la tubería involucran el uso de *pigs* inteligentes para detectar condiciones anormales que eventualmente puedan ocasionar un fallo (Stewart, 2016). Estas anomalías pueden ser cambios en la geometría de la tubería, disminuciones en el espesor de la pared, grietas y defectos de fabricación. En cualquier caso, las anomalías detectadas deben evaluarse y repararse siguiendo la normatividad aplicable (ASME, 2002, 2004).

1.3. Accidentes graves

Como se ha señalado, las tuberías son un componente vital en el proceso de transporte de fluidos. Forman extensas redes de distribución que sirven para transportar grandes cantidades de diferentes sustancias peligrosas, principalmente inflamables y frecuentemente en condiciones de alta presión, lo que las convierte en fuentes potenciales de accidentes graves.

Un **accidente grave** es cualquier suceso imprevisto y no controlado que suponga una situación de grave riesgo, inmediato o diferido, para las personas, los bienes y el medio ambiente, cuya magnitud y gravedad superen los límites del establecimiento en el que ha ocurrido y en el que estén implicadas una o varias

substancias peligrosas (Directiva Europea 2012/18/UE). Esto puede ocurrir tanto en instalaciones industriales como durante el transporte de productos peligrosos.

Los accidentes con estas características implican el escape –instantáneo o continuo– de cantidades significativas de energía o de uno o varios materiales peligrosos de un recipiente, los cuales pueden ser causados por factores tales como la rotura de válvulas, corrosión, daños por actividades de terceros, fallos operacionales, entre otros. Los diversos accidentes graves en los que intervienen materiales peligrosos pueden dar lugar a los siguientes fenómenos peligrosos (Casal y Vílchez, 2010):

- *De tipo térmico*: debido a la emisión de radiación térmica generada en los incendios.
- *De tipo mecánico*: debido a la generación de ondas de sobrepresión y la proyección de fragmentos (elementos característicos de las explosiones). Una explosión puede ocurrir antes de la emisión, por ejemplo, por sobrepresión en tuberías, o posterior a un incendio (por aceleración de la combustión).
- *De tipo químico*: originados por el derrame (líquidos) o escape (gases y vapores) incontrolado de una o más sustancias que se caractericen por ser tóxicas para las personas y el medio ambiente.

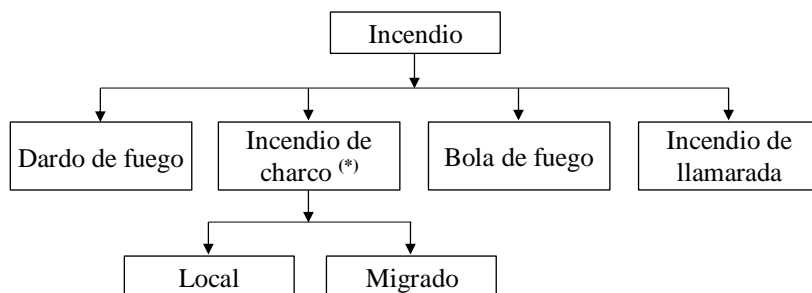
1.3.1. Tipos de accidentes

A continuación, se describen los tipos de accidentes asociados a cada uno de los fenómenos peligrosos anteriores.

a) Fenómenos de tipo térmico: incendios

Son reacciones de oxidación de materiales combustibles, generalmente con aire como agente oxidante o comburente. Sus efectos son la emisión de calor radiante que puede producir daños y propagar la secuencia accidental, y la generación de humos tóxicos, asfixiantes e irritantes (Storch y García, 2008). Los daños de la radiación térmica sobre las personas pueden ser quemaduras en la piel, cuya gravedad dependerá de la intensidad de calor y del tiempo de exposición, cuya combinación define el concepto de dosis. Los humos pueden ocasionar importantes afectaciones a la salud que van desde la pérdida de coordinación, intoxicación, incluso la muerte.

La Fig. 1-3 muestra los tipos de incendios más frecuentes que pueden ocurrir por la ignición de una sustancia inflamable. Su ocurrencia depende de las propiedades físicas y químicas y la disposición del combustible, así como de las condiciones ambientales al momento de la ignición. Enseguida se presenta una descripción de los diferentes incendios mostrados.



(*) Puede ocurrir en el suelo, pero también sobre agua si el líquido derramado es inflamable y no miscible.

Fig. 1-3. Escenarios de tipo térmico en tuberías.

- *Dardo de fuego (jet fire)*: resulta de la ignición inmediata de un chorro turbulento de gases o vapores inflamables a alta presión que se escapan – ya sea a través de un orificio/perforación, de una válvula o de una tubería seccionada– produciendo una llama direccional y estable, de gran longitud y poca anchura, hasta agotar el combustible. Su forma (longitud y diámetro) y posición (vertical, horizontal, inclinado) están determinados por la velocidad del chorro y la orientación del conducto de salida. Por sus características tiene un alcance limitado (habitualmente sus dimensiones son mucho menores que las de un incendio de charco), pero su combustión es mucho más eficiente ya que el aire arrastrado por el chorro mejora la reacción (gran flujo calorífico). Si hay otros equipos o tuberías dentro de su área de acción e incide directamente sobre ellos, puede provocar otros accidentes más graves (efecto dominó).
- *Incendio de charco (pool fire)*: ocurre por la ignición no presurizada (*i.e.*, a cielo abierto) de los vapores generados de un charco de líquido inflamable, cuya extensión depende de la cantidad de líquido derramado y de la geometría y naturaleza del terreno. Si el escape es continuo, la superficie del incendio llegará a un equilibrio entre la aportación de líquido inflamable y la combustión; si el escape es instantáneo, el líquido

puede extenderse, o no, hasta encontrar una barrera o hasta que haya sido consumido completamente por el fuego. En este sentido, los incendios de charco se pueden dividir dependiendo de si el líquido vertido se aleja de la zona del escape o no: la ignición local –inmediata o diferida– del charco generará un incendio en la zona del derrame; por el contrario, si el líquido se aleja del sitio del escape y finalmente encuentra una fuente de ignición, se producirá un incendio de charco lejos del lugar del accidente (incendio de charco de líquido migrado). Por otra parte, cuando la evaporación del líquido del charco es capaz de generar una nube inflamable «conectada» con el propio charco, la ignición retrasada de la nube puede también desencadenar el fuego sobre el charco, por lo que se produce más de un evento peligroso. Los incendios de charco son típicos tanto de líquidos de alta y baja volatilidad, como de gases licuados a presión. Sin embargo, algunas veces no se considera la ignición retrasada para líquidos con baja volatilidad, ya que se cree que no generan nubes de vapor en concentraciones dentro de los límites de inflamabilidad (Ronza et al., 2007).

- *Bola de fuego (fireball)*: ocurre por la ignición inmediata de una gran masa de mezcla de líquido-vapor inflamable que se ha situado de forma instantánea en espacio abierto (con frecuencia derivada de la explosión de un recipiente conteniendo un líquido almacenado a una temperatura superior a su punto de ebullición, BLEVE). En este caso, la explosión se refiere a la rotura abrupta y catastrófica por calentamiento externo (generalmente producido por un dardo de fuego o un incendio de charco) de una tubería que transporta un fluido a presión (típicamente un gas comprimido o un gas licuado con una fracción *flash*¹ grande). La probabilidad de que la tubería estalle aumenta si las llamas inciden directamente sobre ella. Como resultado, la despresurización instantánea de la tubería originará una nube de gas o una mezcla de líquido-vapor que, tras incendiarse, causará una bola de fuego voluminosa de corta duración que producirá una fuerte radiación térmica y una sobrepresión no significativa desde el punto de vista del riesgo.

¹ Se refiere a la parte del gas que se evapora rápidamente al producirse una reducción de la presión de almacenamiento hasta la presión atmosférica.

- *Incendio de llamarada (flash fire)*: ocurre cuando una masa relativamente grande de gas o vapor inflamable se dispersa primero en la atmósfera, se mezcla con el aire y, posteriormente, la mezcla combustible-aire se incendia (siempre que esté dentro de sus límites de inflamabilidad), generando una combustión muy rápida (unos pocos segundos). Una vez incendiada la nube, la llama se desplazará desde el punto de ignición hasta la zona de emisión del fluido (régimen transitorio), quemando todas las zonas de la nube en condiciones de inflamabilidad. Esto puede ser característico de escenarios accidentales como escapes de gases, así como después de la evaporación (súbita o continua) de un líquido inflamable en condiciones atmosféricas. Este tipo de incendio no produce ondas de sobrepresión significativas, por lo que sus efectos a considerar son únicamente los relacionados con la radiación térmica.

b) Fenómenos de tipo mecánico: explosiones

Una explosión es una liberación súbita de energía –en un tiempo muy breve– produciendo una gran masa de gases en expansión contra la atmósfera que la envuelve. Está acompañada de ruido y efectos mecánicos como ondas de sobrepresión y la propagación de proyectiles.

Las explosiones pueden ser físicas o químicas según el tipo de energía que se libere: una explosión física ocurre cuando la energía liberada es de tipo físico (*e.g.*, el escape repentino de un gas comprimido o la vaporización súbita de un líquido), mientras que una explosión química ocurre cuando la energía necesaria para la expansión de los gases a alta presión procede de una reacción química (comúnmente la combustión). Atendiendo a estas definiciones, las explosiones en tuberías se pueden clasificar de la siguiente manera (Fig. 1-4) (Casal, 2008):

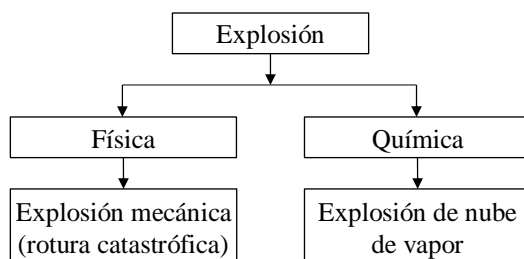


Fig. 1-4. Escenarios de tipo mecánico en tuberías.

- *Explosión de nube de vapor*: es una explosión de tipo químico que involucra la ignición de una gran cantidad de gas o vapor inflamable mezclado con aire, siempre que la mezcla se encuentre dentro de sus límites de inflamabilidad. Ocurre cuando la velocidad de combustión aumenta de manera notable y el frente de llama está fuertemente acelerado, lo cual suele suceder en presencia de turbulencia y un cierto nivel de confinamiento. Por lo general, este evento se asocia a escapes de gases y líquidos inflamables volátiles o de flujos bifásicos.
- *Explosión mecánica*: explosión de tipo físico derivada de la rotura abrupta y catastrófica de una tubería que transporta un gas a alta presión o un líquido sobrecalentado (*i.e.*, un líquido a una temperatura considerablemente mayor que su punto de ebullición a presión atmosférica) en equilibrio con su vapor. Esta rotura suele ocurrir por el aumento repentino de la presión al interior de la tubería o por el fallo de la resistencia mecánica de la pared. En cualquier caso, se producirá la dispersión violenta del fluido contenido y, en consecuencia, la propagación de ondas de sobrepresión y de proyectiles.

Dependiendo su potencia, las explosiones pueden tener un efecto destructivo debido a las ondas de choque generadas, las cuales pueden causar daños en edificios y otras estructuras, incluso pueden derribar o desplazar cuerpos y causar serias lesiones. Otro de los efectos negativos es la propagación de proyectiles, los cuales pueden ser fragmentos de la propia tubería, pero también pueden ser otros objetos situados cerca del sitio de la explosión. En cualquier caso, estos fragmentos y objetos pueden impactar sobre otros equipos y generar nuevos accidentes, pero también pueden impactar contra el cuerpo, causando serias lesiones e incluso la muerte. También, estos pueden actuar como fuentes de ignición si generan chispas al impactar sobre superficies metálicas.

Si bien una explosión puede provocar directamente la muerte, esto es más probable que ocurra si las personas están situadas en el sitio de la explosión o muy cerca. Por otro lado, los efectos indirectos de la destrucción de un edificio por una explosión, tales como el enterramiento y atrapamiento de personas, así como la proyección de objetos punzocortantes (cristales) y otros objetos que pueden golpear (escombros), suelen causar más muertes y lesiones graves que los efectos directos de la explosión.

c) *Fenómenos de tipo químico: escape de sustancias tóxicas y/o contaminantes*

Los escapes de materiales tóxicos pueden causar efectos nocivos graves y la muerte a grandes distancias, ya que al formar nubes pueden propagarse y alcanzar extensiones de terreno considerables. Dependiendo de las condiciones meteorológicas, la nube podría dispersarse en la atmósfera o desarrollarse cerca del suelo y moverse – desde el punto de fuga a varios kilómetros – a la dirección y velocidad del viento. En este caso, si la nube tóxica alcanza concentraciones letales, el número efectivo de víctimas dependerá de la densidad demográfica de los sitios por donde pasa la nube, pero también de las medidas preventivas tomadas ante una emergencia de este tipo (*e.g.*, la evacuación). Incluso si el material liberado no es tóxico, existe riesgo de asfixia en altas concentraciones, especialmente en áreas parcialmente confinadas o cerradas (Bubbico et al., 2014). Se aplican consideraciones similares en la emisión de un líquido contaminante. En este caso, el líquido podría desplazarse generando graves consecuencias para el medio ambiente, como la contaminación de suelo y agua, y la población.

Es importante que, en una emisión accidental de sustancias tóxicas y peligrosas para la vida y salud de la población civil y el medio ambiente, se consideren adecuadamente los resultados finales anteriores en el análisis de riesgos. De lo contrario, las consecuencias graves podrían llegar a ignorarse y el riesgo global sería finalmente subestimado.

1.3.2. Consecuencias

Los efectos dañinos (radiación térmica, sobrepresión, proyectiles y concentración tóxica) de los accidentes graves pueden ocasionar diferentes tipos de impactos, con distinta magnitud, sobre las personas, el medio ambiente y los bienes materiales (del establecimiento, privados y públicos). De acuerdo con Casal (2008), la magnitud de las consecuencias de un accidente grave depende de varios factores, entre los que destacan los siguientes:

- *Cantidad de material involucrado*: la energía involucrada directamente en un accidente es proporcional al volumen de material que se escapa de un recipiente, el cual está determinado por el tipo de pérdida de

contención, el tiempo de detección del escape y el tiempo hasta el cierre de las válvulas de bloqueo.

- *Duración de la pérdida de contención:* la magnitud de las consecuencias de un escape accidental es inversamente proporcional al tiempo durante el cual se libera una determinada cantidad de material peligroso.
- *Energía contenida:* la magnitud de las consecuencias es proporcional a la cantidad de energía contenida en el sistema (energía de presión, calor de combustión).
- *Grado de exposición:* este factor puede tener un efecto considerable en las consecuencias de un accidente, ya que también está relacionado con la distancia entre el punto de origen del accidente y los posibles receptores de sus efectos. A una distancia considerable, la intensidad de los efectos que pueden alcanzar y causar daños a los receptores cercanos será mucho menor que si estos se encuentran cerca del lugar del accidente. En otras palabras, los efectos dañinos se transmiten por el espacio y se atenúan con la distancia.

Los daños sobre los distintos receptores se pueden clasificar según la Fig. 1-5.

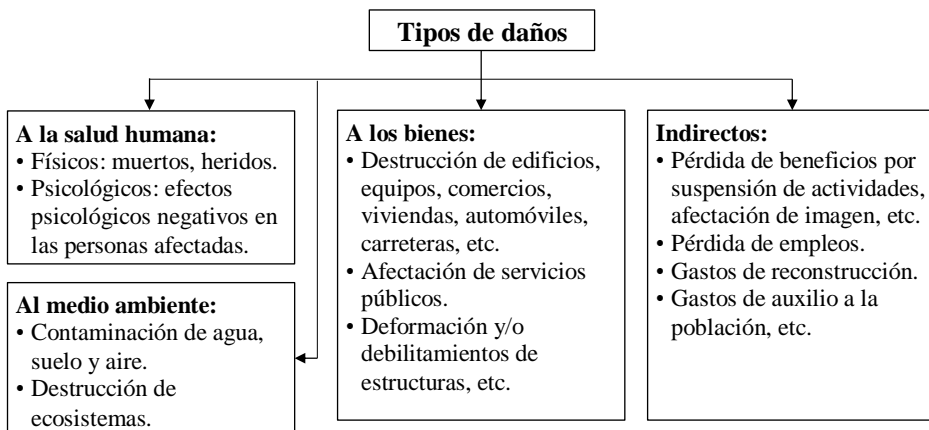


Fig. 1-5. Daños potenciales de un accidente grave.

Las consecuencias sobre la salud humana pueden ser físicas (pérdida de vidas humanas, heridos con consecuencias a corto y largo plazo) y/o psicológicas (efectos psicológicos negativos), y pueden afectar tanto al personal al interior del establecimiento donde ocurre el accidente como a la población externa. Las consecuencias sobre el medio ambiente están relacionadas con la contaminación

de suelo y subsuelo, cuerpos de agua superficiales y subterráneos, y la destrucción de ecosistemas. Las consecuencias sobre los bienes materiales pueden ser daños –totales o parciales– tanto en el interior como en el exterior del establecimiento. Los daños en el exterior pueden ser destrucción de casas, comercios, vehículos, escuelas y servicios públicos, entre otros, afectando de forma directa a la población que hace uso de ellos.

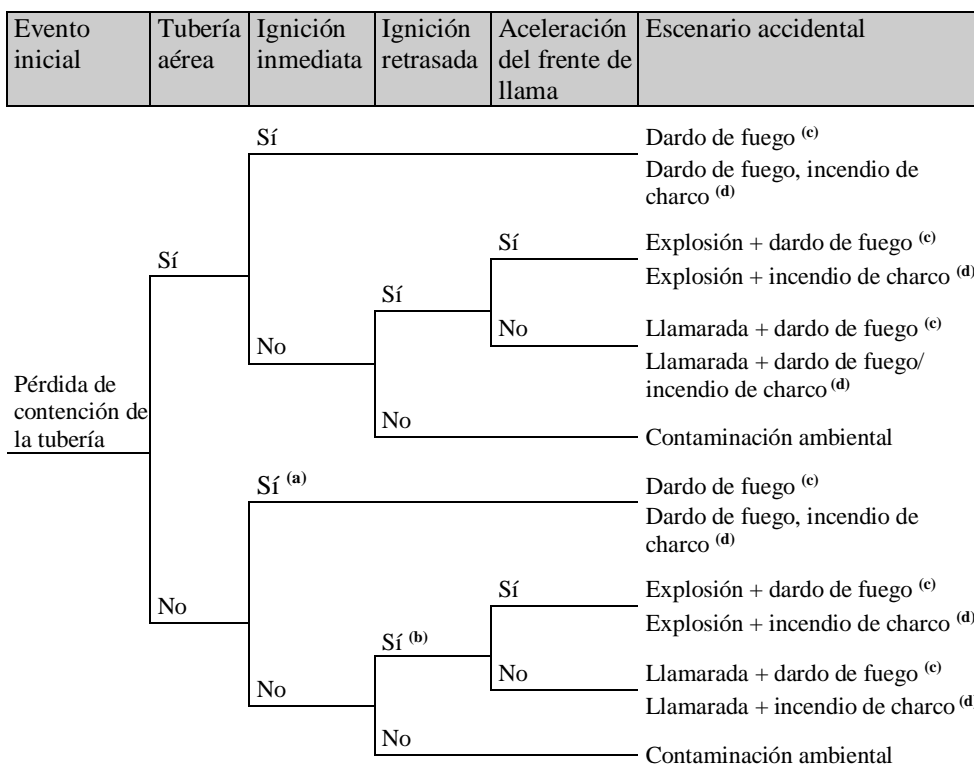
Además de las consecuencias anteriores, los accidentes graves suelen causar daños indirectos como pérdidas económicas (por la suspensión de actividades productivas), pérdida de empleos, gastos de reconstrucción de edificios/viviendas y servicios públicos, gastos de auxilio a la población afectada, así como la afectación de la imagen de la industria y del gobierno, entre otros.

1.4. Evolución de una pérdida de contención de una tubería

Tras la pérdida de contención inicial de un material peligroso pueden ocurrir uno o varios accidentes, ya sea de manera secuencial o simultánea. La probabilidad de que esto suceda depende de factores como las condiciones (presión, temperatura) y el estado físico del fluido liberado (gas o líquido), su naturaleza química (inflamabilidad, toxicidad y volatilidad), la duración y características de la pérdida de contención (rotura total, un orificio, etc.), la tasa de liberación y la cantidad de material liberado, las condiciones meteorológicas (velocidad del viento, clase de estabilidad atmosférica, etc.), entre otros. El árbol de eventos en la Fig. 1-6 muestra un esquema simplificado de las diversas posibilidades.

Un aspecto importante es si la tubería es aérea o enterrada. Si es aérea y el fluido que transporta es inflamable, existe la posibilidad –especialmente en zonas con actividad humana– de ignición inmediata (dentro de los primeros 30 segundos). En este caso habrá un dardo de fuego si el material liberado es un gas, o más probablemente un incendio de charco si se trata de un líquido (aunque también podría ocurrir un dardo de fuego). Si la ignición es retrasada (demorada de ½ a varios minutos), puede ocurrir un incendio de llamarada o una explosión de nube de vapor (VCE) y, después, un incendio de charco (líquido) o un dardo de fuego (gas). Si no hay ignición, el material, si es líquido, contaminará el suelo y posiblemente los acuíferos –existe también la posibilidad de ser drenado hacia un

torrente o un arroyo– o se dispersará en la atmosfera si es un gas o un líquido volátil.



- (a) Solamente si el escape de material crea un cráter.
- (b) Si existe un cráter o si el gas/vapor fluye a través del suelo a la atmósfera.
- (c) Gases inflamables.
- (d) Materiales líquidos inflamables y volátiles.

Fig. 1-6. Árbol de eventos para el escape de gases y líquidos peligrosos de una tubería (Ramírez-Camacho et al., 2016).

En tuberías enterradas, la situación cambiará dependiendo de si el escape inicial originó un cráter. En este caso, similar a una tubería aérea, puede haber una ignición inmediata, con un dardo de fuego (escape de gas) o un incendio de charco o un dardo de fuego (derrame de líquido); nuevamente, si la ignición es retrasada, puede ocurrir un incendio de llamarada o una explosión de nube de vapor, seguido de un incendio de charco (derrame de líquido) o un dardo de fuego (gas). Sin ningún tipo de ignición, se producirá únicamente contaminación ambiental. Si no se forma ningún cráter, el líquido entrará en el suelo y, posiblemente, puede crear un charco en la superficie, mientras que un gas puede fluir a través de los poros del suelo a la atmósfera.

1.5. Riesgo

El **riesgo** es definido como la probabilidad de que se produzca un efecto específico en un período de tiempo determinado o en circunstancias determinadas. Por otra parte, el **peligro** se define como la capacidad intrínseca de una sustancia peligrosa o la potencialidad de una situación física para ocasionar daños a la salud humana, los bienes o al medio ambiente (Directiva Europea 2012/18/UE).

En el contexto popular, estos dos términos suelen utilizarse como sinónimos y se emplean como atributos de una situación o actividad que tiene el potencial de causar un daño sobre determinados elementos vulnerables. Sin embargo, en el ámbito de la seguridad de procesos el riesgo se diferencia del peligro en que este toma en cuenta la frecuencia de ocurrencia del evento no deseado.

Para poder evaluar el riesgo de manera completa, es importante establecer una definición precisa mediante la cual se pueda cuantificar el riesgo. En este sentido, se ha adoptado una de las definiciones más aceptadas en la estimación de este factor, entendido como una función que relaciona la frecuencia con la que ocurre u ocurrirá un evento y la magnitud de sus posibles consecuencias. Habitualmente, esta función toma la forma del siguiente producto:

$$\begin{aligned} \text{Riesgo} &= \text{Frecuencia} \times \text{Consecuencias} \\ R &= F \times C \end{aligned}$$

donde R es el grado de riesgo expresado en consecuencias por unidad de tiempo, F es la frecuencia de ocurrencia del evento al que se asocia el riesgo, expresada en número de eventos por unidad de tiempo, y C son los impactos sobre el entorno humano, el entorno natural y el entorno económico.

El riesgo puede expresarse como riesgo social y riesgo individual. El riesgo social se refiere al número esperado de víctimas para la población ubicada alrededor del sitio del accidente, mientras que el riesgo individual se refiere a la probabilidad de afectación de cada individuo expuesto. Las afectaciones a las personas pueden expresarse en términos de daños inmediatos o a largo plazo. Las afectaciones a nivel social se pueden expresar en los mismos términos de daño a las personas o en otra forma que permita evaluar el impacto social (*e.g.*, pérdidas

económicas por lesiones o muertes, áreas de terreno afectadas, ecosistemas contaminados, etc.).

1.5.1. Clasificación del riesgo

Generalmente hablando, existen diferentes tipos de riesgos. De manera específica, los riesgos en la industria se pueden clasificar de la siguiente manera (Casal et al., 2009):

- *Riesgos convencionales*: son los relacionados con la actividad y el equipo existentes en cualquier sector (riesgo de caída, de cortadura, etc.).
- *Riesgos específicos*: son los asociados a la manipulación o uso de productos que, por su naturaleza, puedan ocasionar daños (riesgo de intoxicación, riesgo de contaminación radioactiva, etc.).
- *Riesgos graves*: están relacionados con accidentes y situaciones de naturaleza excepcional (incendios y explosiones), derivados del escape no esperado de una gran cantidad de productos peligrosos o de energía. Sus efectos peligrosos pueden alcanzar grandes áreas y causar daños a todos los posibles elementos vulnerables que pudieran encontrarse dentro de su rango de acción.

Los dos primeros tipos de riesgo existen en el área laboral y sus consecuencias pueden derivar en una enfermedad laboral o un accidente laboral. Son riesgos relativamente fáciles de prevenir si se gestionan adecuadamente. En el caso de los riesgos graves la situación es muy diferente, ya que por sus características pueden ocasionar graves afectaciones a las personas dentro y fuera del establecimiento, así como amplios daños al medio ambiente y los bienes.

1.6. Análisis de riesgos

El análisis de riesgos es una metodología utilizada para estudiar, evaluar y medir los diferentes riesgos asociados a una instalación industrial, una actividad en particular o al transporte de materiales peligrosos, así como también para calcular las consecuencias producidas por aquellos. Abarca un amplio rango de disciplinas y, dependiendo de su propósito final, puede tener un alto grado de complejidad. Puede ir desde un simple análisis que incluya algunas proyecciones generales hasta evaluaciones más detalladas que pueden durar varios años. La Fig. 1-7 muestra la secuencia de pasos que integran un análisis de riesgos.

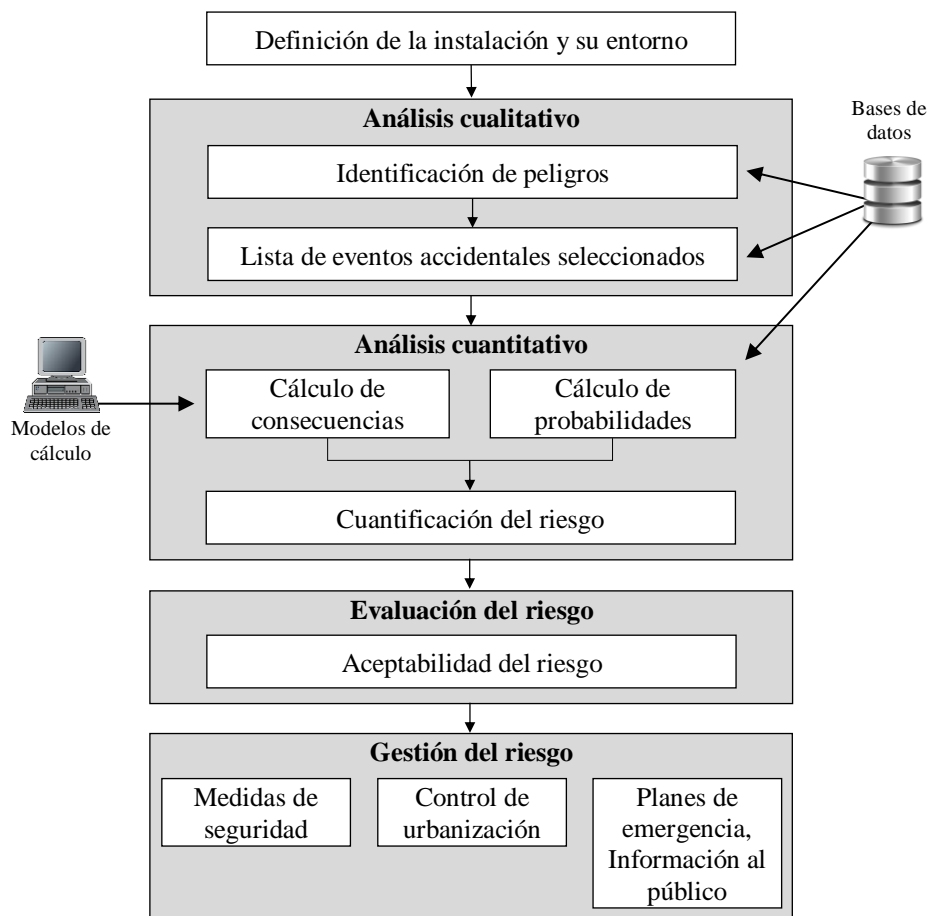


Fig. 1-7. Etapas de un análisis de riesgos (GESIP, 2014).

Los procedimientos de valoración del riesgo van desde técnicas cualitativas hasta cuantitativas. Los métodos cualitativos son los más sencillos de aplicar y suelen utilizar categorías relativas al riesgo como son: alto, medio o bajo. Los métodos cuantitativos evalúan la magnitud de las consecuencias en términos de riesgo geográfico, riesgo individual, riesgo social (muertos, heridos), etc. Existen también procedimientos semicuantitativos, los cuales utilizan índices numéricos para expresar las consecuencias relativas de un accidente. La Tabla 1-2 muestra un resumen de los métodos más generalizados².

² Para conocer más detalles sobre cada una de estas técnicas de análisis se recomienda consultar el documento «Seguridad industrial en plantas químicas y energéticas: Fundamentos, evaluación de riesgo y diseño (2ª Ed.)» (Storch y García, 2008).

Tabla 1-2. Métodos para el análisis de riesgos (Storch y García, 2008).

Método de análisis
<i>Cualitativo</i>
Análisis histórico de accidentes
Análisis preliminar de riesgos
Análisis ¿qué pasa si...?
Listas de comprobación
Análisis de modos de fallos y sus efectos
Análisis funcional de operatividad (HAZOP)
Análisis cualitativo mediante árboles de fallos
Análisis cualitativo mediante árboles de sucesos
Análisis de causas y consecuencias
<i>Cuantitativo</i>
Análisis cuantitativo mediante árboles de fallos
Análisis cuantitativo mediante árboles de eventos
Análisis cuantitativo de causas y consecuencias
<i>Semicuantitativo</i>
Análisis de riesgos con evaluación del riesgo intrínseco
Análisis de modos de fallo, efectos y criticidad
Índice de DOW (incendio y explosión)
Índice de MOND (incendio, explosión y toxicidad)

1.6.1. Identificación de peligros de accidentes graves

El primer paso en cualquier análisis de riesgos consiste en identificar, caracterizar y determinar las posibles fuentes de peligro en un establecimiento o instalación, así como los propios peligros que pueden ocurrir y que tienen el potencial de causar afectaciones sobre la propia instalación, las personas y el entorno. Este paso es fundamental y de él depende el éxito posterior de todo el estudio. Es indispensable, por lo tanto, que se realice una identificación rigurosa y detallada de todos los posibles peligros para lograr un análisis lo más completo y correcto posible.

a) Análisis histórico de accidentes

El Análisis Histórico de Accidentes (AHA) es una técnica bastante utilizada para la identificación de peligros en la industria (Yang et al., 2010). Es un tratamiento esencialmente cualitativo, pero también permite realizar un análisis estadístico – y, por lo tanto, extraer resultados numéricos o cuantitativos– si el número de accidentes analizados es lo suficientemente significativo.

Esta técnica se basa en la búsqueda de información de accidentes pasados. El objetivo es detectar aquellos elementos del sistema (instalaciones y operaciones) que han provocado los accidentes, analizarlos detalladamente y proponer medidas concretas que permitan aumentar la seguridad y reducir el riesgo (Storch y García, 2008).

El registro sistemático de información sobre los diferentes accidentes ocurridos en la industria de procesos y actividades afines, ha permitido –en algunos casos– recolectar datos concretos sobre una determinada situación, equipo u operación, como puede ser el transporte de materiales peligrosos. Por lo tanto, las bases de datos y los informes de accidentes/incidentes suelen ser una excelente fuente de información para analizar accidentes pasados.

A. Procedimiento

La metodología de un análisis histórico no está excesivamente estructurada. Consiste básicamente en obtener la información de las fuentes; el acceso a las bases de datos suele llevarse a cabo mediante palabras clave para acotar la información y seleccionar los registros de interés para el estudio. Posteriormente, los datos seleccionados se procesan estadísticamente para extraer información significativa (tipos de eventos, causas, consecuencias, etc.).

B. Ventajas y limitaciones

Las ventajas que presenta esta técnica es que se basa en casos verídicos, por lo que el riesgo identificado es real y permite el establecimiento de puntos débiles y operaciones críticas en instalaciones similares. Además, es relativamente simple de desarrollar. Por otro lado, las limitaciones que presenta es que la información de los accidentes registrados suele ser incompleta e inexacta. Se limita a los accidentes pasados, los cuales no son representativos de todos los pueden ocurrir. Asimismo, puede ser que algunas causas no se hayan manifestado en los accidentes o que aún no se han detectado.

C. Resultados y aplicabilidad

El resultado principal de un AHA es una lista de eventos que han ocurrido. Su análisis puede dar una idea general del riesgo potencial de la instalación.

También, permite verificar los modelos de predicción de efectos y consecuencias de accidentes con datos reales.

1.6.2. Cálculo de consecuencias

El objetivo de esta etapa es cuantificar el impacto negativo de un evento. Los efectos considerados son la radiación térmica de los incendios, las ondas de sobre presión de las explosiones y la exposición a sustancias tóxicas. Las consecuencias se miden generalmente en términos del número probable de muertos, lesionados o de daños a la propiedad.

Existe una gran variedad de modelos que se utilizan en el análisis de consecuencias, los cuales pueden agruparse de la siguiente manera (Rivera et al., 2006):

- *Modelos fuente y de dispersión:* proporcionan información cuantitativa sobre tasas de liberación y dispersión, así como de los niveles de concentración de una sustancia en la atmósfera. Para ello, consideran la fuente del escape y las condiciones en que se realiza la liberación y dispersión de la sustancia en la atmósfera.
- *Modelos para fuego y explosión:* convierten la información sobre nubes formadas por sustancias inflamables en medidas sobre el peligro potencial. Los modelos de explosión estiman las ondas de choque por sobrepresión y la velocidad de propagación de proyectiles; los modelos de incendio estiman los niveles de radiación térmica.
- *Modelos de efectos:* convierten los resultados específicos de un accidente en efectos sobre las personas y estructuras.

En general, los modelos anteriores consideran el nivel de daño que un accidente podría provocar sobre la salud y el entorno, en función de la distancia o alcance del evento respecto al punto de escape del material o del sitio de la explosión.

1.6.3. Cálculo de frecuencias

Una vez identificados los peligros y evaluados sus impactos, se procede a estimar la frecuencia de ocurrencia de cada evento. El cálculo se puede realizar de manera cualitativa (*e.g.*, opiniones de expertos) o cuantitativa (utilizando registros históricos o modelos lógicos). La forma cualitativa expresa la

frecuencia utilizando categorías relativas como muy frecuente, frecuente, poco frecuente o raro; la forma cuantitativa la expresa en número de eventos por unidad de tiempo.

1.6.4. Estimación o valoración del riesgo total

Una vez identificados todos los posibles escenarios accidentales y calculado sus consecuencias y frecuencias de ocurrencia, se procede a la estimación del riesgo tanto de cada suceso iniciador como de todo el sistema. Posteriormente, los tomadores de decisiones emiten un juicio acerca de la tolerabilidad del riesgo y, por lo tanto, de su aceptabilidad o no.

Teóricamente, la tolerabilidad del riesgo está determinada por una representación gráfica que diferencia entre lo aceptable y lo no aceptable. Por ejemplo, en la Fig. 1-8 se observa que el evento peligroso *A* presenta un nivel de riesgo tolerable, ya que conlleva un alto nivel de consecuencias, pero una baja probabilidad de ocurrencia; por el contrario, el evento peligroso *B* constituye un riesgo no tolerable, pues presenta un menor nivel de consecuencias, pero una mayor probabilidad de ocurrencia. La frontera entre un riesgo tolerable y uno no tolerable presenta gran subjetividad, aunque en muchos casos la tolerabilidad puede estar condicionada a la aplicación de medidas de seguridad.

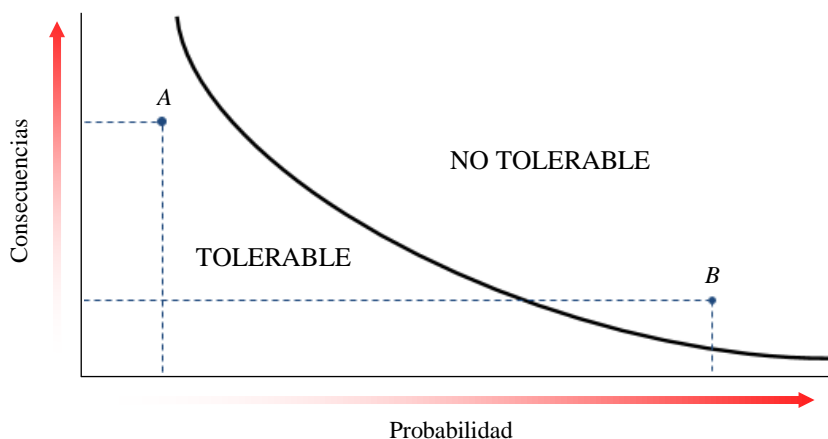


Fig. 1-8. Tolerabilidad del riesgo.

1.7. Efecto dominó

Si bien la mayoría de los accidentes ocurre por fallos mecánicos, factores externos, etc., en algunos de ellos la severidad se incrementa debido al llamado efecto dominó (Reniers y Cozzani, 2013). El efecto dominó puede ampliar la escala de un accidente y la gravedad de sus consecuencias (Hemmatian et al., 2014). Esto puede ser especialmente importante en plantas industriales, debido a la cercanía entre los diversos equipos, pero también en el caso de tuberías, como se verá más adelante.

Existen diversas definiciones de efecto dominó (Reniers, 2010; Alileche et al., 2015), las cuales son válidas desde el punto de vista de la seguridad de procesos, pues se sustentan con bases científicas y tecnológicas. Sin embargo, no existe una definición generalmente aceptada de lo que constituye este término. Por lo tanto, aquí se ha adoptado la siguiente: **Efecto dominó** es un «conjunto correlativo de sucesos en los que las consecuencias de un accidente previo se ven incrementadas por los siguientes, tanto espacial como temporalmente, generando un accidente grave» (Delvosalle, 1996; Delvosalle et al., 1998).

El estudio estadístico de secuencias históricas dominó es la mejor manera de comprender este fenómeno. Permite identificar sus principales características, es decir, los accidentes primarios que dan lugar al efecto dominó (primer nivel de la secuencia dominó), los tipos de efectos físicos generados y sus alcances, las trayectorias de propagación de los accidentes, el o los posibles accidentes secundarios (segundo nivel de la secuencia), y así sucesivamente hasta llegar a los resultados finales. A partir de esta información, se pueden establecer las relaciones entre los diferentes niveles de secuencias dominó.

1.7.1. Elementos de un accidente dominó

Un accidente dominó implica por lo menos tres condiciones fundamentales (Cozzani et al., 2006):

- La existencia de un accidente primario que afecta a una instalación primaria.
- La propagación, mediante vectores escalares, del efecto físico generado por el accidente primario sobre al menos una instalación secundaria.

- La generación de uno o varios accidentes secundarios relacionados con las instalaciones dañadas (el número de eventos secundarios será el mismo que el número de instalaciones dañadas). Estos escenarios secundarios deben ser accidentes más graves y deben extender los daños del accidente primario. La extensión de un accidente dominó puede ser espacial (áreas no afectadas en el accidente primario ahora resultan afectadas), temporal (el accidente secundario afecta a la misma zona, pero es retrasado en el tiempo), o ambas (Casal, 2008).

La Fig. 1-9 muestra un esquema típico de propagación del efecto dominó. El mecanismo mostrado puede seguir diversos patrones de propagación: i) un accidente primario que desencadena un único accidente secundario, ii) un accidente primario que desencadena uno o más accidentes secundarios, los que a su vez desencadenan al menos un tercer escenario, y así sucesivamente.

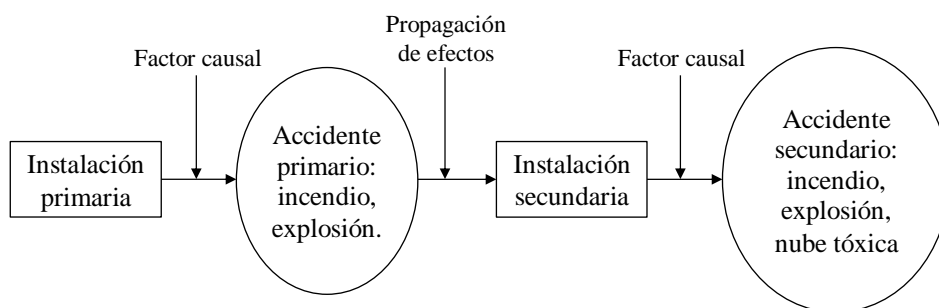


Fig. 1-9. Mecanismo de difusión del efecto dominó.

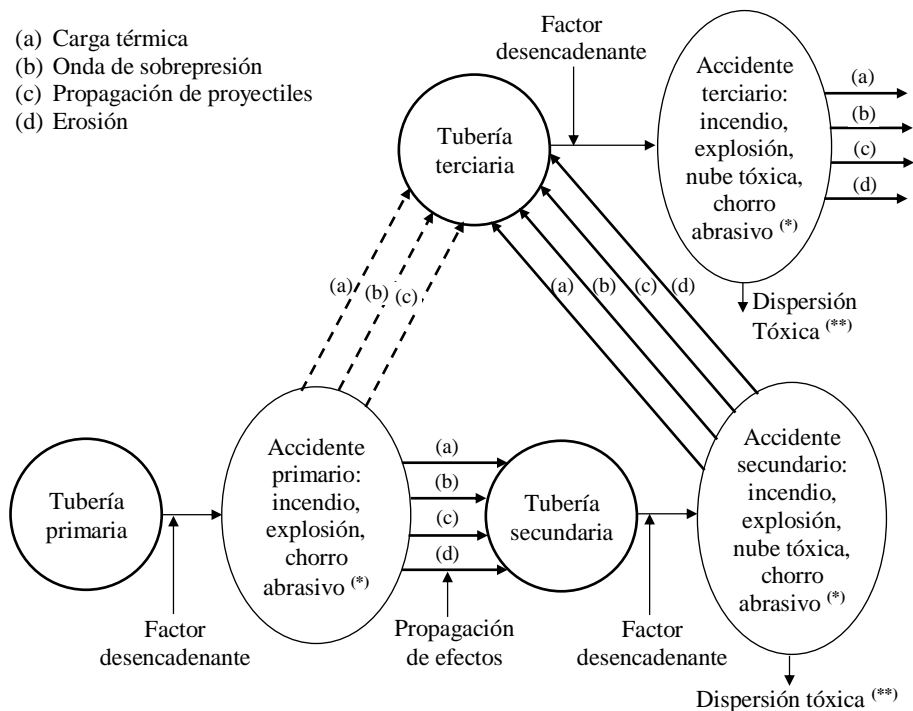
1.7.2. Vectores de escalamiento

Los vectores de escalamiento, como su nombre lo indica, puede propagar los efectos físicos de un accidente primario y escalar su magnitud, provocando un efecto dominó. La Tabla 1-3 muestra los vectores de escalamiento de los diferentes tipos de accidentes primarios en tuberías. En general, los efectos físicos que pueden causar daños directos a otras instalaciones o equipos cercanos y, por lo tanto, generar una secuencia dominó, son el efecto térmico de los incendios y el efecto mecánico de las explosiones; la dispersión tóxica de una emisión no causa efecto dominó. Por otro lado, los efectos de los accidentes secundarios generados pueden ser térmicos, mecánicos o tóxicos.

Tabla 1-3. Vectores de escalamiento generados por los diferentes tipos de accidentes primarios (Reniers y Cozzani, 2013).

Escenario	Accidente primario	Vector de escalamiento
Incendio	Dardo de fuego	Incidencia directa del fuego, radiación térmica
	Incendio de charco	Incidencia directa del fuego, radiación térmica
	Bola de fuego	Incidencia directa del fuego, radiación térmica
	Incendio de llamarada	Incidencia directa del fuego
Explosión	Explosión de nube de vapor	Sobrepresión, incidencia directa del fuego
	Explosión mecánica	Sobrepresión, propagación de proyectiles

1.7.3. Efecto dominó en tuberías



(*) La acción erosiva del chorro dependerá de la probable existencia de un sólido abrasivo.

(**) La dispersión tóxica no causa efecto dominó.

Fig. 1-10. Mecanismo de propagación del efecto dominó en tuberías (basado de Khan y Abbasi, 1998).

Las tuberías se extienden a lo largo de muchos kilómetros cruzando diferentes ambientes (bosques, ríos, zonas urbanas, etc.), por lo que el corredor debe estar diseñado para permitir esta trayectoria. Sin embargo, resulta difícil y costoso establecer un corredor de este tipo, por lo que, en muchos casos, se suele utilizar

un corredor para instalar más de una tubería. Por lo tanto, es posible encontrar tuberías paralelas, a veces con una corta distancia de separación entre ellas, transportando gas, petróleo y otras sustancias a largas distancias. La misma situación existe en zonas urbanas, donde kilómetros de tuberías que transportan gas, gasolina, agua, etc., están enterradas junto con otras líneas de servicio (*e.g.*, cableado eléctrico) (Piccinini et al., 2009). Los pasillos subterráneos en zonas urbanas densamente pobladas tienen a veces una densa disposición de tuberías y servicios públicos, lo que implica un cierto riesgo asociado a la posible interacción de estos sistemas (Casal et al., 1995; NTSB, 2001).

El mecanismo de propagación del efecto dominó en tuberías se muestra, de forma general, en el esquema de la Fig. 1-10.

a) Efecto dominó causado por incendios

Un incendio puede ocurrir en tuberías aéreas, pero también en tuberías enterradas si la formación de un cráter por la pérdida de contención inicial lo permite. Una vez que el fluido liberado se incendia, a condición de que sea inflamable, existe una cierta probabilidad de que las llamas incidan directamente sobre otra(s) tubería(s) cercana(s) y causar su colapso. Si las llamas no inciden directamente, probablemente la segunda tubería no se verá afectada. Sin embargo, si recibe una fuerte radiación térmica, y dependiendo del tipo de fluido que transporte (*e.g.*, un gas), esta todavía podría ceder.

Por sus características, un dardo de fuego puede desencadenar fácilmente un accidente dominó. Un incendio de charco también puede ocasionarlo si otra tubería entra en contacto directo con las llamas (*i.e.*, si queda dentro de los límites del charco); sin embargo, la radiación térmica de un incendio de charco tiene un alcance limitado. Un incendio de llamarada tiene una baja probabilidad de causar un evento dominó debido a su corta duración. Sin embargo, podría incendiar materiales inflamables, por ejemplo, en el caso de depósitos de techo flotante y, de esta manera, conducir a un accidente dominó. Por último, una bola de fuego no puede causar un efecto dominó, ya que su duración, al ser muy breve, es mucho menor al tiempo necesario para causar el fallo de otra tubería. Además, a medida que la bola de fuego se expande, esta asciende verticalmente en el exterior alejándose del punto de origen del accidente, reduciendo así toda probabilidad de incidir sobre otras tuberías y equipos.

b) Efecto dominó causado por explosiones

Dependiendo del grado de exposición y vulnerabilidad, los efectos de una explosión pueden ocasionar afectaciones sobre otras tuberías o instalaciones que se encuentren dentro de su zona de acción. Estos daños pueden ser deformaciones, debilitamientos estructurales, roturas, pérdidas de contención, etc., y, como consecuencia, pueden generar la concatenación de un nuevo accidente grave y ampliar la escala del evento inicial.

c) Efecto dominó causado por la acción de un chorro abrasivo

Existe un tercer vector de escalamiento que ha sido poco estudiado: la acción erosiva de un chorro de fluido que sale a alta presión. Por ejemplo, en tuberías enterradas, el escape de un fluido a alta presión a través de un orificio dará lugar a un chorro altamente abrasivo (*i.e.*, un chorro de fluido arrastrando partículas del suelo circundante) que, si no se incendia, puede incidir sobre una segunda tubería y erosionar la pared hasta provocar su colapso. Si esto sucede, el fallo de la segunda tubería puede dar lugar a otro chorro abrasivo, pero también a un accidente grave y propagar sus efectos a otras tuberías cercanas. De hecho, esto ha ocurrido en algunos accidentes en tuberías. De manera particular, esta situación se trata en el Capítulo 5.

ANÁLISIS HISTÓRICO DE ACCIDENTES EN TUBERÍAS

2.1. Introducción

La existencia de una amplia red de tuberías puede tener una clara influencia en la planificación del uso del suelo, especialmente en zonas con intensa actividad industrial, que por lo general son también las más habitadas. En este escenario es posible encontrar dos situaciones: i) la existencia de una tubería en una zona no habitada inicialmente, que más tarde se convierte en urbana, y ii) la existencia de una tubería en una zona urbana ya existente. En ambos casos, el riesgo inherente a una posible pérdida de contención aumenta en comparación con el existente en una zona rural, debido a las actividades asociadas a la presencia humana. Sin embargo, incluso en las regiones deshabitadas, un accidente puede tener graves consecuencias sobre el medio ambiente, contaminando el suelo o el agua o dañando áreas de especial interés ecológico. En general, se trata de situaciones complejas.

La planificación del uso del suelo tiene por objetivo proteger la salud humana y el medio ambiente a través de la definición del trazado de la tubería o del establecimiento de zonas de seguridad alrededor de la misma. Contribuye también a reducir el riesgo de las actividades de terceros –especialmente los trabajos de excavación– mediante la aplicación de diferentes medidas; estas pueden incluir medidas técnicas tales como el aumento del espesor de la pared de la tubería o la profundidad de enterramiento o señalizando el corredor de la

tubería, o de tipo organizativo como, por ejemplo, asegurar que cualquier trabajo de excavación sea comunicado antes de realizarse (COWI, 2011).

En la actualidad, es ampliamente reconocida la importancia del análisis histórico de accidentes pasados como una fuente de información valiosa sobre sus aspectos principales (tipo de accidente, frecuencia, causas, etc.), la cual puede ser útil para identificar las medidas preventivas adecuadas. En este capítulo se ha reunido una colección de incidentes y accidentes que han ocurrido en diversos países en relación con el uso de redes de tuberías de larga distancia en tierra firme, para crear una base de datos específica para el análisis histórico de estos eventos. Se analizaron sus principales características y consecuencias para ilustrar el riesgo asociado a estos sistemas y su importancia en la planificación del uso del suelo.

2.2. Recolección y filtrado de datos

El estudio se llevó a cabo mediante el uso de bases de datos de accidentes y otras fuentes de información. Solamente se han considerado los accidentes ocurridos después del 1 de enero de 1980, ya que los requisitos para el registro de estos accidentes eran menos rigurosos antes de esa fecha; desde entonces también han mejorado tanto la gestión de emergencias como las consideraciones de seguridad.

La base de datos MHIDAS (2007) (Major Hazard Incident Data Service), administrada por la Ejecutiva de Sanidad y Seguridad del Reino Unido (Health and Safety Executive – HSE), se ha utilizado como fuente inicial de información. Contiene 14.168 registros de accidentes que se han producido durante el transporte, procesamiento o almacenamiento de materiales peligrosos, y que han ocurrido en 95 países desde principios del siglo XX hasta noviembre de 2006.

Para identificar los registros específicamente relacionados con los accidentes originados en tuberías terrestres de larga distancia, se realizó una primera operación de filtrado en la base de datos MHIDAS basada en los campos OG (origen general) y OE (origen específico) (Fig. 2-1). Entre los orígenes generales (almacenamiento, transporte, proceso, etc.) se seleccionó la actividad de transporte. En esta categoría se filtraron los accidentes con origen específico en tuberías. Posteriormente se analizó el campo «Resumen» de los accidentes –uno por uno– con el fin de comprobar que éstos fueron seleccionados correctamente. Los accidentes ocurridos en tuberías mar adentro, los causados por sabotaje o en

tuberías de corta distancia (*i.e.*, tuberías de transferencia, líneas de servicio de gas, etc.), no fueron considerados en este estudio.

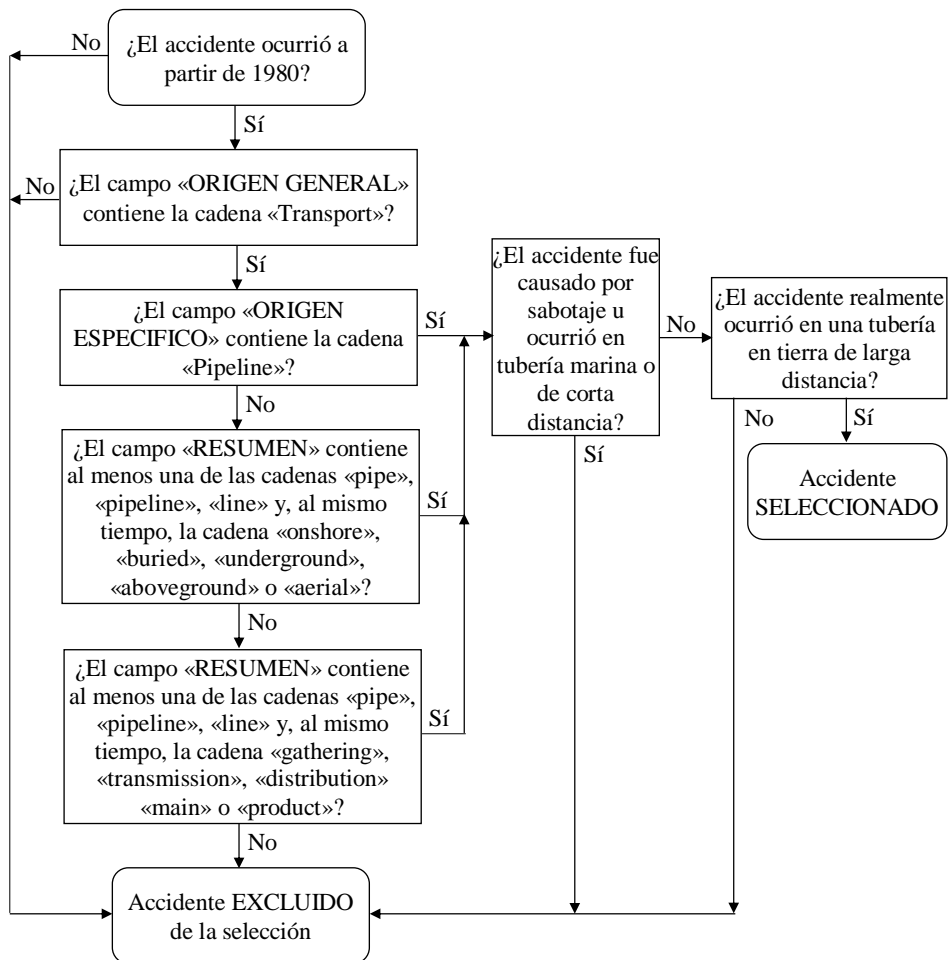


Fig. 2-1. Criterios de búsqueda y selección para extraer los accidentes en tuberías de la base de datos MHIDAS.

Después de aplicar este proceso de extracción en la base de datos MHIDAS, el número de accidentes se redujo considerablemente. Finalmente, se obtuvo una colección de 639 accidentes.

Una de las limitaciones de MHIDAS es el hecho de que un accidente puede tener más de un registro si existe más de una causa, más de un tipo de evento o varios materiales involucrados. Para resolver este problema, se creó una nueva base de datos (BD1) –con una nueva estructura de los campos existentes en MHIDAS y

nuevos campos adicionales– en formato Microsoft Excel, lo que permitió la aplicación de estrategias de filtrado y el tratamiento posterior de los datos. Los campos utilizados en este estudio se muestran en la Tabla 2-1. La descripción detallada de la estructura de la base de datos se indica en el Apéndice D.

Tabla 2-1. Campos de la base de datos desarrollada.

Campo de MHIDAS	Descripción
AN	Número del incidente en MHIDAS
DA	Fecha del incidente
LO	Lugar de ocurrencia
PD	Densidad de población en el sitio del incidente
IT	Tipo de incidente
OG	Origen (general y específico)
GC	Causa general
SC	Causa específica
MN	Material involucrado
MT	Tipo de material
MH	Peligros del material
QY	Cantidad de material liberado
DR	Daños económicos
KR	Número de fatalidades
IR	Número de heridos
ER	Número de evacuados
AB	Resumen (breve descripción del incidente)
<i>Campos adicionales</i>	
	Parte involucrada del sistema
	Tipo de sistema
	Tipo de instalación
	Año de instalación de la tubería
	Diámetro de la tubería
	Presión de operación
	Presión en el momento del fallo
	Cantidad de material recuperado
	Daños ambientales
	Fuentes de información del incidente

Durante este análisis, se han tenido en cuenta los siguientes aspectos:

- En MHIDAS, el campo IT «Tipo de incidente» clasifica los accidentes en cuatro categorías básicas: pérdida de contención, incendio, explosión y nube de gas. Sin embargo, cada IT básico puede incluir información más detallada. Para una mejor organización de los datos, se añadieron dos nuevos campos, «Incidente general» e «Incidente específico», en sustitución del anterior. Así, el primer campo clasifica cada accidente de

acuerdo con las cuatro categorías básicas anteriores, y el segundo indica el tipo de evento específico. Por ejemplo, un incendio puede ser un dardo de fuego, una llamarada, etc. Si la información relacionada con los eventos específicos era incompleta o inexistente en algún registro, solamente se aplicaron los cuatro tipos básicos.

- El campo «Incidente general» indica el evento final que se produjo, después de una pérdida de contención, y como resultado de las posibles combinaciones de eventos básicos. Las diferentes combinaciones pueden resultar en:
 - Pérdida de contención (escape de líquido): se refiere al escape de un líquido de baja volatilidad, para el que no se han formado nubes de vapor. Este evento es típico para sustancias como el gasóleo y combustible para aviones.
 - Pérdida de contención seguida por la dispersión de una nube de gas (escape de líquido): indica la liberación de un gas comprimido (GN), un gas licuado a presión (GLP, amoníaco) o líquidos volátiles (petróleo crudo, gasolina, y otros productos ligeros del petróleo). En algunos casos también se considera un charco de líquido o la migración del líquido.
 - Pérdida de contención seguida de incendio: ocurre cuando una sustancia inflamable, debido a la acción de una fuente de ignición, se incendia. Se refiere a dardos de fuego, nubes de gas inflamable o nubes de vapor inflamable generadas por la vaporización de líquidos principalmente volátiles.
 - Pérdida de contención seguida de explosión: este evento tiene lugar, en las mismas condiciones que el anterior, cuando se produce una situación de aceleración del frente de llama.
 - Pérdida de contención seguida de explosión e incendio: cuando la explosión conduce también al incendio de la sustancia que continúa liberándose de la abertura de la tubería o que ha llegado a otro sitio por la migración.
- Para cada tipo de incidente general que participa en la secuencia de eventos, se han definido diferentes tipos de incidentes específicos. En particular, se han identificado dos modalidades de pérdida de contención:

- *Orificio/perforación*: se refiere a una abertura de pequeño diámetro (menor que el diámetro de la tubería), cuyo tiempo de detección oscila entre 20 segundos y 24 horas (Dziubiński et al., 2006). Frecuentemente se conoce a un escape de larga duración como una «fuga» (líquidos y gases) y al escape de corta duración como un «derrame» (líquidos).
- *Rotura total*: es cuando la extensión de la zona dañada de la tubería es igual o mayor que su diámetro. Este tipo de escape conduce, en la mayoría de los casos, a la interrupción automática de la línea.
- En algunos casos se desconocía la modalidad de pérdida de contención que causó el incidente. Mientras que una pérdida de contención era habitualmente la causa de un incendio o una explosión, tal evento se citaba generalmente sólo si era de larga duración y/o si causó daños. Por lo tanto, en los casos en los que la modalidad de escape no pudo determinarse, éstos se clasificaron simplemente como «pérdida de contención desconocida».
- Las pérdidas de contención que causaron nubes de gas no siempre fueron reportadas; sin embargo, es evidente que las nubes son una consecuencia directa del escape no deseado de gases o líquidos volátiles (tóxicos e inflamables). Por lo tanto, todas las nubes de gas se consideraron precedidas por una pérdida de contención.

La calidad de la información de los registros extraídos de MHIDAS implicó problemas en su análisis, pues en muchos de ellos la información era incompleta o inexacta (*i.e.*, la descripción era imprecisa o corta y carecía de detalles sobre el desarrollo del evento). Esta problemática también ha sido manifestada por otros autores en trabajos similares (Hauer y Hakkert, 1998; Hemmatian et al., 2014). Otro inconveniente que presenta esta base de datos es que ya no se actualiza; específicamente proporciona información sobre accidentes en tuberías solo hasta 2005.

Para contar con información lo más exacta, actualizada y completa posible para este estudio, se realizó una investigación paralela consultando información de libre acceso de fuentes oficiales. El objetivo era complementar la información faltante en los registros seleccionados de MHIDAS, así como localizar nuevos

registros de accidentes. Al mismo tiempo, se extendieron los intervalos de búsqueda hasta 2014. Las principales fuentes adicionales consultadas fueron:

- La base de datos ARIA (Análisis, Investigación e Información sobre Accidentes, por su nombre en español) (ARIA, 2014a).
- El Instituto Federal Alemán de Investigación y Ensayo de Materiales (BAM, 2009).
- La Organización Europea de Compañías Petroleras para la Protección del Medio Ambiente y la Salud (CONCAWE, 2013).
- El Consejo de Seguridad del Transporte de Canadá (TSB, 2014a).
- El Ejecutivo de Salud y Seguridad del Reino Unido (HSE, 2000, 2002).
- La Administración de Seguridad de Tuberías y Materiales Peligrosos del Departamento de Transporte de los Estados Unidos, (PHMSA, 2014a).
- La Junta Nacional de Seguridad del Transporte de los Estados Unidos (NTSB, 2014a).

Después de esta investigación paralela, la información recopilada fue sistematizada en una segunda base de datos (BD2) de acuerdo con el modelo y formato propuesto (Tabla 2-1). La BD2 incluye un total de 542 accidentes adicionales.

Cuando se utilizan diferentes bases de datos y otras fuentes de información, el volumen de datos aumenta significativamente. En consecuencia, la búsqueda y recuperación de datos se dificulta y, en algunos casos, la información puede resultar duplicada. Para evitar esta situación, se realizó un proceso de verificación cruzada entre ambas bases de datos (BD1 y BD2), siguiendo un enfoque similar utilizado por otros autores para integrar datos de diversas fuentes (Trépanier et al., 2009). El objetivo era encontrar registros coincidentes. Este procedimiento se realizó de manera manual, centrándose en los campos «Fecha del incidente» y «Lugar de ocurrencia» como referencias iniciales para este propósito. En los casos en que dos registros coincidían, se procedía a confirmar la duplicación y posteriormente los datos se integraban en un registro maestro común.

Finalmente, después de aplicar este procedimiento, se obtuvo una colección de 1.063 accidentes, los cuales se han analizado estadísticamente para conocer sus

características, tales como los tipos de eventos ocurridos, sus causas, materiales involucrados, consecuencias, entre otros aspectos.

A manera de resumen, el siguiente diagrama (Fig. 2-2) presenta el desarrollo paso a paso de la metodología seguida para la obtención de los registros de interés para este estudio.

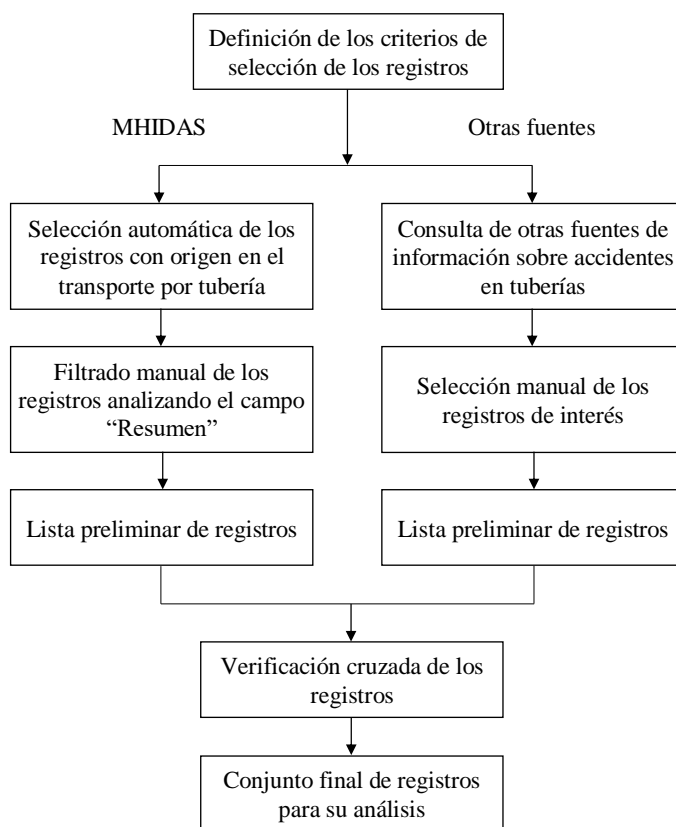


Fig. 2-2. Metodología de selección de los registros de accidentes en tuberías.

2.3. Análisis de datos

2.3.1. Cobertura de la base de datos

Los campos más importantes para la comprobación de la disponibilidad de datos, así como para el análisis de los accidentes y sus consecuencias, se listan en la Tabla 2-2. Cabe señalar que existen registros en los que la extracción manual de la información, tal como se ha indicado en la Sección 2.2, no proporcionó ningún dato adicional. La existencia de un campo de datos no garantiza la existencia de

un valor, por lo que era común no encontrar ningún valor para muchos campos de datos en la información consultada.

Tabla 2-2. Disponibilidad de datos en la base de datos desarrollada (registros totales = 1.063).

Campos de datos	Disponible	No disponible	% disponibilidad
Fecha del incidente	1.063	0	100,0
Lugar de ocurrencia	1.063	0	100,0
Densidad de población	566	497	53,2
Evento general	1.063	0	100,0
Evento específico	1.057	6	99,4
Causa general	759	304	71,4
Causa específica	668	395	62,8
Tipo de sistema	732	331	68,9
Parte involucrada del sistema	1.057	6	99,4
Tipo de instalación	532	531	50,0
Diámetro de la tubería	589	474	55,4
Material involucrado	1.063	0	100,0
Tipo de material	1.063	0	100,0
Peligros del material	1.063	0	100,0
Cantidad de material liberado	598	465	56,3
Cantidad de material recuperado	344	719	32,4
Medio de escape	987	76	92,9
Número de fatalidades	667	396	62,7
Número de heridos	667	396	62,7
Número de evacuados	425	638	40,0
Daños (dólares americanos)	311	752	29,3

Para todos los campos de la base de datos utilizados en este estudio, excepto para los campos «Cantidad de material recuperado», «Número de evacuados» y «Daños», la disponibilidad de datos es superior al 50%, algunos de ellos alcanzan o se acercan al 100% de cobertura. La cantidad de material liberado/recuperado y los daños económicos son parámetros difíciles de medir, por lo que su escasez no es de extrañar. Además, los valores disponibles en estos campos no son exactos, pero son números aproximados o estimados. Por otro lado, la falta de datos sobre el número de personas afectadas en algunos registros puede indicar indirectamente que no existieron y por esta razón no se registraron, por lo que la cifra real de disponibilidad de datos en estos campos puede ser mayor.

2.3.2. Distribución temporal

El análisis preliminar de la distribución temporal de los accidentes de tuberías mostró que la tendencia no es uniforme y varía considerablemente en todo el período analizado (Fig. 2-3). La disminución repentina en el número de accidentes a partir de 2006 se debe a que la base de datos MHIDAS únicamente contiene registros de accidentes industriales hasta 2006, concretamente hasta 2005 sobre accidentes en tuberías.

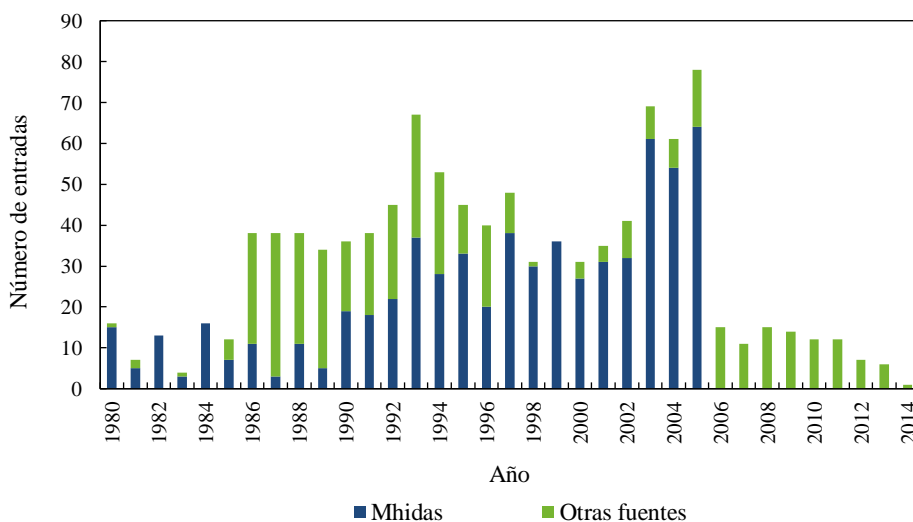


Fig. 2-3. Distribución anual de los accidentes en tuberías (período 1980–2014).

Esta distribución no uniforme se justifica también por los cambios en los criterios de notificación de incidentes y accidentes implementados en los últimos años (PHMSA, 2016a, 2016b). Por ejemplo, en 1984 la legislación exigió que las empresas reportaran los incidentes que involucraron el escape de gas y que hubieran causado daños a la propiedad, incluyendo el costo del gas perdido, a partir de US\$ 50.000 dólares. Respecto a las tuberías de líquidos peligrosos, en 1991 se hizo obligatorio reportar los incidentes con pérdidas a partir de 50 barriles de líquidos peligrosos o dióxido de carbono; en 2002, la cantidad mínima de reporte cambió a solamente 5 galones. En 1994 se estableció un umbral de reporte de US\$ 50.000 dólares para la estimación de daños a la propiedad, incluyendo el costo de limpieza y recuperación, el valor del producto perdido y los daños a la propiedad del operador o de otros, o de ambos.

2.3.3. Distribución geográfica

Tabla 2-3. Distribución geográfica de los accidentes en tuberías.

Continente	Número de entradas	Porcentaje
<i>América</i>	684	64,3
EE. UU.	587	55,2
Canadá	37	3,5
México	25	2,4
Ecuador	10	0,9
Otros países (10)	25	2,4
<i>Europa</i>	143	13,5
Reino Unido	42	4,0
Francia	12	1,1
Italia	8	0,8
Ucrania	6	0,6
Otros países (14)	75	7,1
<i>Eurasia</i>	120	11,3
Rusia	103	9,7
Kazakstán	6	0,6
Turquía	5	0,5
Georgia	3	0,3
Otros países (2)	3	0,3
<i>Asia</i>	61	5,7
Pakistán	18	1,7
Irán	9	0,8
China	6	0,6
India	6	0,6
Otros países (14)	22	2,1
<i>África</i>	45	4,2
Nigeria	27	2,5
Argelia	8	0,8
Egipto	3	0,3
Sudáfrica	2	0,2
Otros países (5)	5	0,5
<i>Oceanía</i>	10	1,0
Australia	7	0,7
Nueva Zelanda	2	0,2
Guam	1	0,1
Total	1.063	100,0

La distribución geográfica de los accidentes en tuberías terrestres a nivel mundial (Tabla 2-3) muestra que más del 50% de los eventos se concentran en un país. Los Estados Unidos presentaron el mayor número de accidentes (587 casos), seguidos en menor medida por Rusia (103 casos). El caso de los Estados Unidos se explica en parte por el hecho de que la mayoría de las fuentes consultadas provienen de

este país –debido a la facilidad de acceso a la información– y también porque es el país que cuenta con la mayor red de tuberías de hidrocarburos (CIA, 2017). En el caso de otros países, el acceso a la información de los accidentes está restringido o es nulo, o implica un coste económico.

2.4. Resultados

2.4.1. Tipos de eventos

a) *Eventos generales*

Los eventos generales de los accidentes se clasificaron de la siguiente manera: pérdida de contención, incendio, explosión y nube de gas. La información relacionada con el evento general es conocida en las 1.063 entradas de la base de datos. Su contribución se puede observar en la Tabla 2-4. Puesto que en un mismo accidente puede existir más de un tipo de evento, la suma de todos los porcentajes es superior al 100%. Se asumió una pérdida de contención inicial en todos los casos. Para los tres eventos restantes, la formación de una nube de gas fue el evento más frecuente (643 casos); este evento se refiere tanto a gases (inflamables, corrosivos y/o tóxicos) como a líquidos volátiles (inflamables). El siguiente evento más frecuente fue el incendio (256 casos), seguido de las explosiones (131 casos). Prácticamente dos de cada tres eventos involucraron una nube de gas que finalmente se dispersó, uno de cada cuatro involucró un incendio, mientras que en uno de cada ocho implicó una explosión.

Tabla 2-4. Distribución de las secuencias accidentales.

Evento general	Número de entradas	% del total
Pérdida de contención	1.063	100,0
Nube de gas	643	60,5
Incendio	256	24,1
Explosión	131	12,3
<i>Clasificación con categorías exclusivas</i>		
Pérdida de contención → Dispersión de nube de gas (gases y líquidos volátiles)	643	60,5
Pérdida de contención → Incendio	185	17,4
Pérdida de contención (líquidos de baja volatilidad)	104	9,8
Pérdida de contención → Explosión → Incendio	71	6,7
Pérdida de contención → Explosión	60	5,6

Usando una clasificación con categorías exclusivas (*i.e.*, una distribución en la que la suma de los porcentajes es 100), la contribución más alta corresponde a los accidentes en los que se ha formado una nube de gas después de una pérdida de contención (60,5%). En menor medida, la segunda secuencia más frecuente fue una pérdida de contención seguida de un incendio, con 17,4%. La pérdida de contención sin ningún otro evento tuvo una contribución del 9,8%, y se refiere a al escape de líquidos de baja volatilidad (*e.g.*, gasóleo), en los que el riesgo de formación de una nube es reducido. Un escape seguido de una explosión ocurrió en 12,3% de los casos (en 6,7%, la explosión fue seguida de un incendio).

b) Eventos específicos

Tabla 2-5. Distribución de los accidentes en tuberías por tipo de eventos específicos.

Evento específico	Número de entradas	% de categoría	% del total
<i>Accidentes con al menos uno de los siguientes tipos de pérdida de contención</i>			
Orificio/perforación	691	65,0	65,0
Rotura total	343	32,3	32,3
Modalidad desconocida	29	2,7	2,7
<i>Accidentes con al menos uno de los siguientes tipos de nube de gas</i>			
Nube inflamable	635	98,8	59,7
Nube tóxica/inflamable	8	1,2	0,8
<i>Accidentes con al menos uno de los siguientes tipos de incendio</i>			
		(a)	(b)
Dardo de fuego	144	56,3	13,5
Incendio de llamarada	55	21,5	5,2
Incendio de charco	39	15,2	3,7
Bola de fuego	32	12,5	3,0
Incendio desconocido	44	17,2	4,1
<i>Accidentes con al menos uno de los siguientes tipos de explosión</i>			
Explosión de nube de vapor (VCE)	131	100,0	12,3

^(a) Los porcentajes suman más de 100 ya que 56 entradas involucraron más de un tipo de incendio.

^(b) La suma de estos porcentajes no coincide con los de la Tabla 2-4, ya que hay 54 entradas con dos tipos de incendio y dos entradas más con tres tipos de incendio.

Se analizaron los eventos específicos involucrados en los accidentes (Tabla 2-5). En cuanto a la modalidad de pérdida de contención, la mayor contribución corresponde a escapes a través de un orificio/perforación (65,0% del total), seguidos por la rotura total (32,3%).

Para los eventos que implicaron la dispersión de una nube de gas, las nubes inflamables tuvieron una frecuencia muy alta (98,8% de la categoría), lo cual concuerda con el hecho de que la mayoría de los materiales de alto riesgo

involucrados en los accidentes son más pesados que el aire (gasolina, GLP, etc.). Las nubes tóxicas/inflamables existieron únicamente en el 0,8% del total, y están relacionadas con materiales tales como amoníaco y monóxido de carbono.

Respecto a los eventos clasificados con fuego, el tipo de incendio más frecuente fue el dardo de fuego (56,3% de la categoría, 13,5% del total), que generalmente ocurre por el escape de un fluido inflamable a alta presión a través de un orificio. Este fue seguido por el incendio de llamarada (5,2% del total).

Por último, en los eventos clasificados con explosiones, cabe señalar el hecho de que la explosión de una nube de gas siempre implica también un incendio de llamarada, aunque en tal caso las bases de datos generalmente sólo mencionan la explosión como un accidente grave (siguiendo los criterios generalmente utilizados en el análisis de riesgos). Por otro lado, el fallo de una tubería de alta presión, como las que transportan gases comprimidos o gases licuados a presión, teóricamente puede dar lugar a una onda expansiva. Sin embargo, no se encontró ninguna referencia específica sobre este tipo de evento en los informes utilizados en esta investigación. Puede ser una cuestión de discusión si esto es debido a la falta de información o porque realmente nunca sucedieron; no obstante, con base en esta evidencia experimental, la explosión física no se ha considerado aquí.

2.4.2. Distribución de accidentes según su causa

a) Distribución por causa general

Respecto a las causas generales de los accidentes, las posibilidades bajo consideración fueron las siguientes: las actividades de terceros, corrosión, fallos mecánicos, errores humanos/operativos, peligros naturales y fallos del equipo.

Las actividades de terceros representan cualquier interferencia mecánica externa causada por terceros operadores que desconocen la presencia de la tubería. En el caso particular de las tuberías enterradas, las causas específicas están relacionadas con excavadoras, empresas de construcción o equipos utilizados en actividades de excavación, agricultura, etc. Las tuberías que cruzan otras líneas de servicios públicos (*e.g.*, tuberías de agua/gas, líneas telefónicas, etc.) tienen un mayor potencial de sufrir incidentes ocasionados por terceros. En general, la interferencia mecánica conduce a una perforación, una grieta o una abertura que reduce el espesor de la pared de la tubería; dependiendo de estos factores, el fallo

de la tubería puede ser inmediato o puede ocurrir tiempo después por fatiga o corrosión. Por otro lado, los errores humanos/operativos se refieren a errores cometidos durante las actividades de mantenimiento, reparación/reemplazo, puesta en marcha, etc., causando daños en la tubería.

Tabla 2-6. Causas generales de los accidentes en tuberías.

Causa general	Número de entradas	% del total
Dato conocido	759	71,4
Dato desconocido	304	28,6
	Número de entradas	% de datos conocidos (*)
Actividades de terceros	286	37,7
Corrosión	159	20,9
Fallos mecánicos	148	19,5
Errores humanos/operativos	64	8,4
Peligros naturales	53	7,0
Fallos del equipo	52	6,9
<i>Accidentes con una sola causa</i>		
Actividades de terceros	285	37,5
Corrosión	157	20,7
Fallos mecánicos	145	19,1
Errores humanos/operativos	64	8,4
Peligros naturales	53	7,0
Fallos del equipo	52	6,9
<i>Accidentes con más de una causa</i>		
Actividades de terceros	1	0,1
Corrosión	2	0,3
Fallos mecánicos	3	0,4

(*) Los porcentajes suman más del 100% ya que 3 entradas involucraron más de una causa general.

De los 1.063 accidentes considerados en este estudio, la causa general solamente se conocer en 759 casos (71,4% del total). La contribución de las diversas causas generales se resume en la Tabla 2-6. Tres de ellas muestran una contribución substancial: las actividades de terceros (37,7% de los casos conocidos), la corrosión (20,9%) y los fallos mecánicos (19,5%); los errores humanos/operativos, los peligros naturales y los fallos en los equipos tienen una contribución menor.

Los accidentes también se pueden clasificar según si tuvieron una sola causa o más de una (Tabla 2-6). En 756 registros había solamente una causa. De estos, las actividades de terceros fueron las más frecuentes, seguidas por corrosión y fallos mecánicos. Exclusivamente en tres accidentes se encontró más de una causa. El

fallo mecánico estuvo presente en los tres casos asociados con otras causas, siendo estas la corrosión y la actividad de terceros.

b) Distribución por causa específica

La distribución de los accidentes por causa específica se muestra en la Tabla 2-7. La causa más frecuente de los accidentes fueron las actividades de terceros. La mayoría de estos eventos (76,2%) fueron causados por maquinaria de excavación, seguidos por daños por un vehículo u otro equipo no relacionado con actividades de excavación. Después, con mucha menor frecuencia está el tráfico fluvial y las cargas pesadas (e.g., de un camión). En el 6,3% de los casos no había información disponible sobre el tipo de actividad de terceros.

Tabla 2-7. Causas específicas de los accidentes en tuberías.

Causa específica	Número de entradas	% de causa general	% de causa conocida
<i>Actividades de terceros</i>			
Maquinaria de excavación	218	76,2	28,7
Vehículo/equipo no relacionado con excavación	44	15,4	5,8
Tráfico fluvial	3	1,0	0,4
Cargas pesadas	2	0,7	0,3
Líneas de alta tensión	1	0,3	0,1
Causa desconocida	18	6,3	2,4
<i>Corrosión</i>			
Externa	76	47,8	10,0
Interna	36	22,6	4,7
Corrosión bajo tensión	16	10,1	2,1
Causa desconocida	31	19,5	4,1
<i>Fallos mecánicos</i>			
			(*)
Fallo de soldadura	43	29,1	5,7
Defecto del material	25	16,9	3,3
Sobrepresión	22	14,9	2,9
Defecto de construcción	16	10,8	2,1
Envejecimiento	14	9,5	1,8
Fallo en estructura de soporte	1	0,7	0,1
Causa desconocida	29	19,6	3,8
<i>Errores humanos/operativos</i>			
Mantenimiento	23	35,9	3,0
Reparación/reemplazo	20	31,3	2,6
Puesta en marcha	5	7,8	0,7
Operaciones generales	4	6,3	0,5
Desmantelamiento	3	4,7	0,4
Operación de válvula	3	4,7	0,4
Roscado en caliente (<i>hot tapping</i>)	1	1,6	0,1

Análisis histórico de accidentes en tuberías

Causa específica	Número de entradas	% de causa general	% de causa conocida
Operación de <i>pigging</i>	1	1,6	0,1
Prueba de presión	1	1,6	0,1
Apagado	1	1,6	0,1
Causa desconocida	2	3,1	0,3
<i>Peligros naturales</i>			(*)
Deslizamiento de tierra	26	49,1	3,4
Inundación	12	22,6	1,6
Relámpago	5	9,4	0,7
Fuertes lluvias	5	9,4	0,7
Bajas temperaturas	2	3,8	0,3
Erosión	1	1,9	0,1
Causa desconocida	4	7,5	0,5
<i>Fallos del equipo</i>			
Brida	18	34,6	2,4
Válvula	15	28,9	2,0
Bomba/compresor	6	11,5	0,8
Otros	5	9,6	0,6
Causa desconocida	8	15,4	1,1

(*) La suma de estos porcentajes no coincide con los de la Tabla 2-6, ya que hay dos eventos con dos causas específicas para la misma causa general.

Respecto a los accidentes causados por corrosión, el tipo más frecuente fue la corrosión externa, seguido por la corrosión interna y, por último, corrosión bajo tensión. Estos datos indican que el mantenimiento es un tema muy importante para proteger la integridad de una tubería. En cuanto a los accidentes con fallos mecánicos, la causa específica más frecuente fue el fallo de la soldadura (43 casos), seguido por defectos en los materiales, la sobrepresión, defectos de construcción y el envejecimiento; aquí se hace nuevamente evidente la importancia del mantenimiento.

En los accidentes causados por errores humanos/operativos, la fuente más frecuente de errores fueron las actividades de mantenimiento y las operaciones de reparación o reemplazo. En menor medida se encuentran la puesta en marcha y operaciones generales. Es importante destacar que, si bien este tipo de errores presenta una menor frecuencia que, por ejemplo, las actividades de terceros, su contribución puede reducirse significativamente con la adecuada capacitación de los operadores.

Los accidentes Natech³ tienen también una cierta contribución. Entre los accidentes originados por peligros naturales, la causa específica más frecuente fueron los corrimientos de tierra (26 casos), seguidos, en menor proporción, por las inundaciones (12 casos) y los rayos y fuertes lluvias con la misma contribución. Estos peligros naturales ocurren con frecuencia en paisajes abruptos, con terreno escarpado y torrentes, y no son fáciles de evitar.

Por último, para los eventos causados por fallos de los equipos, la contribución más importante fue la de los fallos en las bridas, seguidos por fallos en las válvulas y el mal funcionamiento de las bombas/compresores. Esto pone en evidencia las partes más interesantes del sistema que deben ser inspeccionadas.

2.4.3. Distribución de accidentes según las características de la tubería

a) *Distribución por tipo de tubería*

Los tipos de tuberías fueron descritos en la base de datos usando los siguientes valores: líneas de recolección, líneas de transmisión, líneas de distribución y otras líneas. La Tabla 2-8 proporciona la distribución de las entradas según el tipo de tubería donde ocurrieron los accidentes. Esta información estaba disponible en el 68,9% de los casos. De estos, la mayoría ocurrieron en tuberías de transmisión (647 casos, 88,4% de los casos conocidos); 475 de estos casos corresponden a tuberías que transportaban productos del petróleo. Los accidentes en el resto de sistemas fueron menos frecuentes: solamente 8,6% ocurrieron en líneas de distribución, el 1,6% en tuberías de recolección, y el 1,4% en otro tipo de tuberías (*e.g.*, amonoductos).

Tabla 2-8. Tipos de tuberías involucradas en los accidentes.

Tipo de tubería	Número de entradas	% del total
Dato conocido	732	68,9
Dato desconocido	331	31,1
	<u>Número de entradas</u>	<u>% de datos conocidos</u>
Líneas de transmisión	647	88,4
Líneas de distribución	63	8,6
Líneas de recolección	12	1,6
Otras líneas	10	1,4

³ Accidentes en los que los mundos natural y tecnológico chocan, provocando la pérdida de contención de materiales peligrosos, incendios y/o explosiones (Girgin y Krausmann, 2014).

b) Distribución por diámetro de la tubería

El análisis del tamaño de las tuberías afectadas por los accidentes muestra una tendencia hacia las tuberías de menor diámetro (Tabla 2-9). Las tuberías menores de 10 pulgadas de diámetro son las más comúnmente involucradas (41,3% de los casos conocidos), seguidas por las tuberías de entre 10 y menos de 20 pulgadas de diámetro (33,1%). En menor medida, el 13,1% y el 9,2% de los accidentes ocurrieron en los rangos de diámetros de entre 20-30 pulgadas y 30-40 pulgadas, respectivamente. El número de accidentes fue muy inferior para las tuberías a partir de 40 pulgadas de diámetro.

Tabla 2-9. Diámetro de las tuberías involucradas en los accidentes.

Diámetro	Número de entradas	% del total
Dato conocido	589	55,4
Dato desconocido	474	44,6
	Número de entradas	% de datos conocidos
< 10"	243	41,3
≥ 10" y < 20"	195	33,1
≥ 20" y < 30"	77	13,1
≥ 30" y < 40"	54	9,2
≥ 40"	20	3,2

c) Distribución por tipo de instalación

Es un hecho que, en las zonas habitadas o con importante actividad humana, la mayoría de las tuberías están instaladas bajo tierra, generalmente a poca profundidad de la superficie por la facilidad de instalación y acceso durante las actividades de mantenimiento o reparación. Este tipo de instalación es especialmente ventajosa, ya que el suelo proporciona un modo conveniente de apoyo a las tuberías para protegerlas de la exposición a elementos naturales y de los riesgos provocados por el hombre, además de que así las tuberías no producen ruidos ni impacto visual.

Respecto al tipo de instalación, esta información se conoce en 532 casos (Tabla 2-10). Los datos analizados muestran que la mayoría de los accidentes (94,4% de los casos conocidos) ocurren en tuberías enterradas y el resto en tuberías aéreas. Sin embargo, estos porcentajes deben tomarse con cautela, ya que se desconoce el tipo de instalación en el 50% de los casos.

Tabla 2-10. Tipo de instalación de las tuberías involucradas en los accidentes.

Tipo de instalación	Número de entradas	% del total
Dato conocido	532	50,0
Dato desconocido	531	50,0
	<u>Número de entradas</u>	<u>% de datos conocidos</u>
Enterrada	502	94,4
Superficial	30	5,6

2.4.4. Partes del sistema de tuberías involucradas en los accidentes

Referente a las partes del sistema donde ocurrieron los accidentes, la Tabla 2-11 muestra la distribución de la información correspondiente. El 99,4% del total de los casos reportó esta información. La mayoría de los eventos (aproximadamente 97% de los casos conocidos) ocurrieron en las tuberías y solamente unos cuantos en instalaciones complementarias como estaciones de bombeo o de compresión.

Tabla 2-11. Partes del sistema de tuberías donde han ocurrido los accidentes.

Parte involucrada	Número de entradas	% del total
Dato conocido	1.057	99,4
Dato desconocido	6	0,6
	<u>Número de entradas</u>	<u>% de datos conocidos</u>
Tubería	1.024	96,9
Bomba/compresor	33	3,1

2.4.5. Materiales involucrados

La Tabla 2-12 resume la información relativa a los materiales involucrados en los eventos. Puesto que un accidente puede involucrar más de un material, la suma de los porcentajes es nuevamente mayor que 100. 14 entradas tuvieron más de un material, de las cuales nueve casos involucraron dos materiales cada uno, cuatro casos implicaron tres materiales cada uno, y únicamente en uno de los casos intervinieron cuatro materiales.

Si se analiza el tipo o estado de los materiales (Tabla 2-13), es evidente que los líquidos fueron los materiales más frecuentemente involucrados (alrededor del 70% de los eventos); esto concuerda con el hecho de que la mayor parte de los materiales transportados por tuberías son líquidos.

Tabla 2-12. Principales materiales involucrados en los accidentes en tuberías.

Material	Frecuencia	% del total (*)
Gasolina	304	28,6
Gas natural	289	27,2
Petróleo crudo	288	27,1
Gasóleo	64	6,0
Combustible para aviones	52	4,9
Gas licuado del petróleo (GLP)	34	3,2
Queroseno	15	1,4
Otros productos del petróleo	11	1,0
Amoníaco	7	0,7
Nafta	7	0,7
Otros	12	1,1

(*) Los porcentajes suman más del 100% debido a que 14 eventos involucraron más de un material.

Tabla 2-13. Clasificación de los accidentes de tuberías en función del tipo de material involucrado.

Condición	Número de entradas	% de total (*)
Líquido	741	69,7
Gas	342	32,2

(*) Los porcentajes suman más del 100% debido a que 14 eventos involucraron más de un material (véase la Tabla 2-12).

En la Tabla 2-14 se resumen los resultados para los tipos de peligros (tóxicos, inflamables, corrosivos) asociados a los materiales liberados. Como algunos casos implicaron más de un material, y puesto que un solo material puede tener asociados más de un tipo de peligro (*e.g.*, puede ser «inflamable» y «tóxico» simultáneamente), la suma de todos los peligros es mayor que el número de entradas. Los materiales inflamables estuvieron implicados en la mayoría de los casos, mientras que los productos tóxicos y corrosivos muestran una pequeña contribución.

Tabla 2-14. Peligros asociados a los materiales involucrados.

Peligro	Número de entradas	% del total (*)
Inflamabilidad	1.081	101,7
Toxicidad	9	0,8
Corrosivo	7	0,7

(*) Los porcentajes no suman 100% debido a que 14 eventos involucraron más de un material (véase la Tabla 2-12), además de que un solo material puede tener asociados más de un tipo de peligro.

Respecto a la cantidad de material liberado como consecuencia de los accidentes, este dato únicamente se conoce en el 56,3% de los casos (Tabla 2-15). De los casos conocidos, la mayoría (67,5%) tuvo un volumen de liberación de entre 5 m³ y menos de 500 m³, y en 15,2% de los casos la cantidad liberada varió entre 500 m³ y 5.000 m³. En muy pocos casos la cantidad fue superior a 5.000 m³. El valor más alto en la base de datos, alrededor de 19.600.000 m³ de GN liberado, corresponde al accidente ocurrido en Rapid City, Manitoba (Canadá) en 1995 (TSB, 1997).

Tabla 2-15. Distribución de los accidentes en tuberías según el volumen de material liberado.

Volumen liberado	Número de entradas	% del total
Dato conocido	598	56,3
Dato desconocido	465	43,7
	Número de entradas	% de datos conocidos
< 5 m ³	77	12,9
≥ 5 m ³ y < 50 m ³	161	26,9
≥ 50 m ³ y < 500 m ³	243	40,6
≥ 500 m ³ y < 5.000 m ³	91	15,2
≥ 5.000 m ³ y < 50.000 m ³	8	1,3
≥ 50.000 m ³	10	3,0

De los principales materiales involucrados (véase la Tabla 2-12) y de los cuales se conoce el volumen liberado, en el caso de la gasolina, a pesar de ser el material más comúnmente involucrado, el volumen total liberado fue cerca de 43.000 m³ (271 casos). Este volumen es mucho menor si se compara con el GN, que tuvo un volumen liberado aproximado de 62.991.500 m³ en un total de 23 casos conocidos. El petróleo crudo contribuyó con un volumen aproximado de 461.600 m³ distribuido en 176 eventos.

2.4.6. Densidad de población donde ocurrieron los accidentes

Un aspecto muy importante, en relación con las consecuencias sobre la población, es si el accidente se produjo en una zona habitada. Para analizar esto se aplicaron dos categorías: zona urbana (ciudad o pueblo) y zona rural (población dispersa o ninguna). La información correspondiente es conocida en 566 casos (Tabla 2-16). El 68,6% de estos accidentes ocurrieron en zonas rurales y el resto en zonas urbanas. No obstante, estos porcentajes deben tratarse con cautela, ya que la fiabilidad de los datos puede no ser muy buena: un accidente

ocurrido en una zona urbana es mucho más evidente e impactante que un evento similar en una zona rural y, por lo tanto, la probabilidad de ser incluido en una base de datos es mayor en el primer caso que en el segundo (Vílchez et al., 1995).

Tabla 2-16. Distribución de los accidentes en tuberías por densidad de población.

Densidad poblacional	Número de entradas	% del total
Dato conocido	566	53,2
Dato desconocido	497	46,8
	Número de entradas	% de datos conocidos
Rural	388	68,6
Urbana	178	31,4

2.4.7. Consecuencias de los accidentes

a) Consecuencias sobre las personas

La vida humana puede verse afectada por un accidente grave de varias maneras diferentes, dependiendo de la gravedad de los efectos y la ubicación (exposición) de la población. Después de un accidente grave, las personas pueden morir, resultar lesionadas o ser evacuadas de sus hogares, lugares de trabajo o de ocio. De esta manera, las consecuencias sobre las personas pueden clasificarse en tres categorías: número de muertes, número de heridos y número de personas evacuadas. Del número total de entradas en la base de datos, 667 contenían información sobre la posible ocurrencia de muertos y heridos; en el resto de entradas (396) estos dos valores son desconocidos. El 76,3% de estas 667 entradas no registraron muertes ni lesionados, mientras que en el 23,7% restante se produjeron muertes y/o personas lesionadas.

Respecto al número de muertes, la Fig. 2-4 muestra la distribución del número de entradas en categorías arbitrarias (0 muertos, 1-10 muertos, etc.). Los valores entre paréntesis indican el porcentaje de entradas para las que se conoce esta información. En 571 entradas (85,6% de los casos conocidos, 53,7% del total) no se registraron muertes. Entre los casos en donde si las hubo, la mayoría corresponden a la categoría de 1-10 muertes (77 entradas, 11,5% de los casos conocidos, 7,2% del total). En muy pocos casos hubo más de 10 muertes registradas (19 entradas, 2,9% de los casos conocidos, 1,8% del total), es decir, el porcentaje de entradas con un número «grande» de muertes es bajo. En total, las

personas murieron en el 14,4 % de las entradas donde se registró la información (9,0% de todas las entradas).

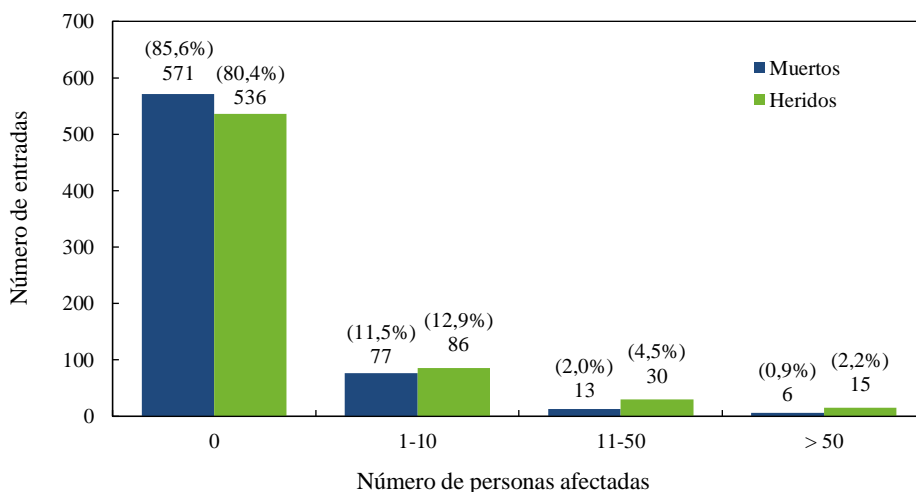


Fig. 2-4. Distribución de los accidentes en tuberías en función del número de muertos y heridos.

El máximo número de víctimas mortales, aproximadamente 600, ocurrió en un accidente en una zona deshabitada cerca de Ufa, Rusia (URSS entonces) en 1989. Una fuga en una tubería que transportaba GN generó una enorme nube inflamable y la llegada de dos trenes originó la explosión; de hecho, este es un caso bastante anómalo con consecuencias muy graves sobre las personas (trenes de pasajeros), a pesar de que ocurrió en una zona deshabitada.

El número de heridos se muestra también en la Fig. 2-4. En este caso, 536 entradas (80,4% de los casos conocidos, 50,4% del total) no registraron heridos, mientras que, para la mayor parte de las entradas con información de los lesionados, el número de heridos osciló entre 1 y 10 (86 casos) y en 30 casos el número de personas heridas fluctuó entre 11 y 50. En pocos casos (15) el número de heridos fue superior a 50. En total, las personas resultaron heridas en el 19,6% de las entradas donde se precisó esta información (12,3% de todas las entradas).

El máximo número de personas heridas (1.800) se produjo en un accidente ocurrido en 1992 en Guadalajara, México, donde una gran fuga de gasolina de una tubería causada por corrosión desencadenó una serie de explosiones en el sistema de alcantarillado, destruyendo 15 kilómetros de calles.

Respecto al número de personas evacuadas como consecuencias de los eventos, 425 entradas contenían esta información (Fig. 2-5). De estas, nadie fue evacuado en el 80,5% de los casos; entre aquellos en los que hubo evacuados, la mayoría corresponden a la categoría de 1-100 (49 entradas, 11,5% de los casos conocidos, 4,6% del total). En 21 casos el número de evacuados osciló entre 101 y 1.000, y en 10 casos el número de desplazados osciló entre 1.001 y 10.000. El valor más alto, aproximadamente 30.000 personas, corresponde a un accidente ocurrido en 1981 en San Francisco, California (NTSB, 1982), donde unos trabajadores perforaron accidentalmente una tubería de GN, originando una nube inflamable.

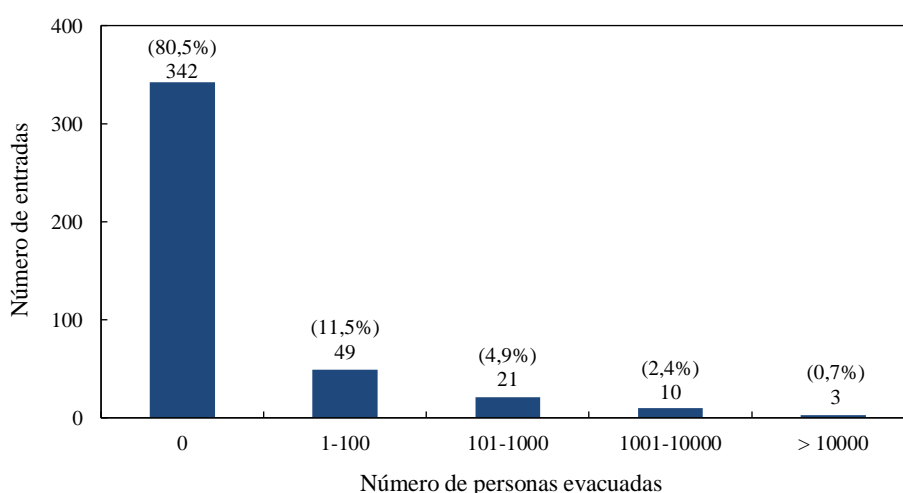


Fig. 2-5. Distribución de los accidentes en tuberías en función del número de evacuados.

b) Consecuencias sobre el medio ambiente

Es interesante evaluar el número de entradas en las que el medio receptor fue reportado. Para ello se utilizaron tres categorías: suelo, agua y aire. La categoría de suelo incluye la tierra, el subsuelo, diques, estanques de contención; la categoría de agua incluye ríos, pantanos, sistemas de alcantarillado, humedales, lagos, corriente/riachuelo y estanques. La Tabla 2-17 muestra la distribución de las entradas de acuerdo con esta clasificación; solamente se consideró la primera sustancia involucrada. Esta información estaba disponible en el 92,9% de los casos.

Tabla 2-17. Distribución de los accidentes en tuberías según el medio receptor de los materiales liberados.

Medio receptor	Número de entradas	% del total
Dato conocido	987	92,9
Dato desconocido	76	7,1
	<u>Número de entradas</u>	<u>% de datos conocidos</u>
Suelo	440	44,6
Aire	335	34,0
Suelo y agua	110	11,1
Agua	102	10,3

El principal medio receptor de la mayoría de los materiales involucrados fue el suelo (44,6% de los casos conocidos), seguido de la atmósfera (aire) con 34,0% y, finalmente, el agua (10,3%). El 11,1% de los casos involucraron dos medios receptores, esto es, liberaciones al suelo que posteriormente alcanzaron un cuerpo de agua. Es importante mencionar que en algunos eventos el material liberado fue consumido por el fuego, evitando o reduciendo así las afectaciones al ambiente. Sin embargo, en este estudio no fue posible determinar el porcentaje de accidentes en los que esto haya sucedido.

c) Pérdidas económicas

Como se ha señalado, las personas pueden morir, sufrir lesiones, o ser evacuadas debido a un accidente grave. En cualquier caso, esto puede generar un costo para la empresa o la administración responsable del evento. La monetización de cualquier aspecto de la vida humana es un tema delicado y polémico, aunque es necesario para estimar el impacto económico de un accidente; es muy difícil estimar el valor de la vida de una persona, o de los posibles costos de por vida que un accidente tendrá sobre una persona que ha sufrido sus efectos. Sin embargo, en la práctica a menudo es necesario asignar un valor económico a por lo menos alguna de las posibles consecuencias de los accidentes graves en la vida humana. Guidi et al. (2001) presentaron una lista de valores promedio de los costos, por persona, calculados para muertes y lesiones (entre 100.000 euros y 1,2 millones de euros dependiendo del nivel de daño causado).

Por supuesto, también pueden ocurrir otro tipo de pérdidas en los accidentes: equipos y edificios destruidos, costo de las acciones de remediación de la

contaminación y los costos indirectos asociados a la interrupción de la producción y a la pérdida de imagen de la empresa.

Las pérdidas económicas resultantes como consecuencia de los accidentes se conocen únicamente en 311 casos (29,3%) de la base de datos, aunque no se dan generalmente detalles sobre las diversas contribuciones posibles; los datos se muestran en la Tabla 2-18. La mayor parte de estos eventos (70,7%) causaron pérdidas económicas entre US\$ 5000 y menos de US\$ 500.000 y, en el 21,8% de los casos, las pérdidas económicas oscilaron entre US\$ 500.000 y menos de US\$ 50 millones. En muy pocos casos, las pérdidas económicas fueron superiores a US\$ 50 millones. El valor más alto existente en la base de datos, alrededor de US\$767 millones, corresponde al accidente ocurrido en un humedal en Marshall, Michigan (NTSB, 2012).

Tabla 2-18. Pérdidas económicas resultantes de los accidentes.

Pérdidas económicas	Número de entradas	% del total
< \$5.000	19	6,1
≥ \$5.000 y < \$50.000	102	32,8
≥ \$50.000 y < \$500.000	118	37,9
≥ \$500.000 y < \$5 M	52	16,7
≥ \$5 M y < \$50 M	16	5,1
≥ \$50 M	4	1,3

Estas cifras muestran claramente que las pérdidas económicas causadas por un accidente pueden ser considerables. Sin embargo, la información examinada no permite un tratamiento estadístico, ya que existe una dificultad inherente en la comparación de los datos económicos correspondientes a diferentes períodos (inflación) y lugares. Algunos valores de los 311 casos disponibles provienen directamente de MHIDAS, que no especifica si las pérdidas económicas para cada registro se actualizaron, o no, a un determinado año de referencia; otros valores se obtuvieron de distintas fuentes de información (CONCAWE, base de datos ARIA, NTSB, DOT de EE. UU., y PHMSA).

2.5. El transporte por tubería y la planificación del uso del territorio

El uso del territorio tiene esencialmente finalidades residenciales, comerciales, industriales y agrícolas. Todos estos usos implican una serie de actividades que,

si se desarrollan cerca de una tubería, pueden, bajo ciertas circunstancias, causar daños a la misma –una perforación o su rotura total– con la consiguiente pérdida de contención. Como a menudo las tuberías transportan fluidos peligrosos, la mayoría de ellos inflamables y algunos tóxicos, esta pérdida de contención puede originar un accidente grave (incendio, explosión, nube tóxica).

Si bien las tuberías pueden considerarse como un modo de transporte seguro en comparación con el transporte por carretera, ferrocarril o barco, lo cierto es que se producen accidentes con cierta frecuencia. La razón principal de esto es la extraordinaria longitud de las tuberías que se encuentran en servicio hoy en día en muchos países, una longitud que está aumentando continuamente. Sin embargo, otra razón importante es la existencia de las actividades antes mencionadas, las cuales pueden tener interacción con las tuberías y dañarlas.

El análisis histórico ha evidenciado esta influencia: a pesar de que los accidentes ocurren también en zonas deshabitadas debido a la corrosión o a eventos naturales tales como, por ejemplo, los corrimientos de tierra, entre los casos estudiados, la causa más frecuente de accidentes han sido las actividades de terceros, especialmente los asociados con maquinaria de excavación.

Sin embargo, es un hecho que la proximidad de las tuberías con las actividades típicas de una zona habitada es prácticamente inevitable: las tuberías transportan los materiales a las zonas en las que son consumidos y estas son las zonas urbanas. Por lo tanto, es evidente que deben aplicarse las regulaciones requeridas para controlar el riesgo que esta proximidad implica, disminuyendo tanto la frecuencia esperada de los posibles accidentes, como sus potenciales efectos y consecuencias. Y aquí es claro que la planificación del territorio debe jugar un papel esencial.

Estas regulaciones deben, en primer lugar, mantener la distancia de seguridad entre las tuberías y las zonas habitadas; esto es especialmente importante al poner en marcha nuevas tuberías, pero también para controlar el crecimiento de las zonas urbanas cerca de una tubería existente. Las regulaciones deben afectar a las diversas partes interesadas: tanto el propietario y el usuario del corredor de la tubería, como también los usuarios del terreno adyacente a la tubería; esta zona puede ser utilizada, pero bajo cierto control, para asegurar la prevención de

cualquier posible daño. Asimismo, la administración debe prever la actuación en situaciones de emergencia.

El análisis histórico realizado ha puesto de manifiesto que en casi todos (98,5%) los accidentes analizados, el material involucrado era inflamable; por consiguiente, los fenómenos peligrosos asociados serán en la mayoría de los casos una nube de gas inflamable o un incendio, cuyos efectos pueden tener un alcance importante.

Por lo tanto, se debe establecer una cierta «distancia de control» sobre la que cualquier desarrollo propuesto sea sometido a un análisis de riesgos. No deben permitirse elementos vulnerables dentro de las zonas cubiertas por un determinado valor de riesgo individual; esto implica una distancia mínima que es función del material transportado, el tamaño de la tubería, la presión de operación, la distancia entre las válvulas de bloqueo, etc., para estos elementos.

Además de los mencionados impactos accidentales, otro aspecto importante es el mantenimiento de la tubería: el estudio ha demostrado que el 40% de todos los accidentes fueron originados por corrosión o fallos mecánicos; aquí, la edad de la tubería y el mantenimiento de la misma son factores muy importantes. Esto ya no está relacionado con las actividades próximas a la tubería, sino con su condición; es decir, es claramente responsabilidad exclusiva del usuario o propietario de la tubería. Otro aspecto a considerar, en el que debe hacerse especial hincapié, es la instalación de tuberías en zonas propensas a corrimientos, inundaciones, etc.

2.6. Conclusiones

Entre los principales accidentes analizados, los incendios fueron los eventos más comunes (siendo los dardos de fuego el tipo más frecuente de incendio), seguidos por las explosiones. Esto se debe al hecho de que la mayoría de los fluidos transportados son inflamables; las mayores contribuciones son las de la gasolina, el gas natural y el petróleo, que estuvieron involucrados en el 83% de todos los accidentes.

Las tuberías cruzan tanto zonas rurales como urbanas. A pesar de que en las zonas habitadas existen más actividades que podrían afectar la integridad de las tuberías e interferir con posibles pérdidas de contención, es en las zonas rurales

donde han ocurrido la mayoría de los accidentes (68,6%). Esto se debe a que la mayor proporción de tuberías atraviesan estas zonas con respecto a aquellas que cruzan zonas urbanas.

No obstante, este análisis pone de manifiesto que se debe hacer un esfuerzo para mejorar la seguridad en las zonas habitadas/urbanas, donde pueden producirse graves consecuencias sobre las personas. Se encontró que la causa más frecuente de los accidentes son las actividades de terceros, esencialmente las relacionadas con maquinaria de excavación. Muchas veces las tuberías cruzan otras líneas de servicios públicos (*e.g.*, tuberías de agua, líneas de servicio de gas, líneas telefónicas, etc.), lo que incrementa el daño potencial por terceros que desconocen la presencia de la línea; además, las actividades relacionadas con la construcción de edificios o nuevas infraestructuras cerca de la tubería pueden tener también una importante contribución. Especialmente en el caso de las tuberías enterradas, los pasillos deben ser debidamente señalizados y protegidos y, en caso de obras de urbanización, se deben aplicar medidas específicas y las regulaciones relativas tanto a estas actividades como a la protección de la tubería deben aplicarse de manera estricta.

La contaminación del medio ambiente está directamente relacionada con el volumen del material liberado, que depende en gran medida de la distancia entre las válvulas de bloqueo y del tiempo necesario para detener el escape de la sección dañada. Aproximadamente el 45% de los accidentes de tuberías resultaron en escapes a la tierra, incluyendo diques y contenciones secundarias. Las emisiones a la atmósfera fueron el 34%, mientras que los escapes a cuerpos de agua corresponden al 10,3%.

Aunque un número significativo de accidentes han dado lugar a una serie de muertes y lesiones a las personas, el transporte de materiales peligrosos a través de tuberías parece ser un modo más seguro que el transporte por ferrocarril o por carretera. Sin embargo, se debe hacer un esfuerzo para disminuir su riesgo y, en este sentido, la planificación del uso del suelo es una cuestión esencial.

PROBABILIDADES CONDICIONALES DE LOS EVENTOS POSTERIORES AL ESCAPE DE MATERIALES PELIGROSOS DE LAS TUBERÍAS

3.1. Introducción

Una de las etapas que integran la metodología de cuantificación del riesgo es la estimación de la frecuencia de ocurrencia de las diferentes secuencias de eventos. Esta etapa puede verse especialmente afectada por un nivel de incertidumbre bastante elevado, si el sistema bajo investigación no está definido con suficiente claridad y si no se conocen todos los datos de entrada necesarios. Este es el caso de los sistemas de transporte por tuberías, donde está presente una alta variabilidad de las características de los territorios atravesados por la tubería y una amplia gama de posibles eventos impredecibles (Dziubiński et al., 2006).

La frecuencia de ocurrencia de accidentes puede ser estimada mediante un análisis estadístico de datos históricos que, siempre que sea aplicable, es la metodología más fiable, o por medio de modelos teóricos tales como el Análisis de Árboles de Fallos (AAF) y el Análisis de Árboles de Eventos (AAE). Ambos enfoques han sido adoptados en la literatura, dedicados principalmente a la identificación de la frecuencia de ocurrencia de una pérdida de contención (Henselwood y Phillips, 2006; Han y Weng, 2010), en lugar de calcular la probabilidad de ocurrencia de los diferentes eventos posibles tras el escape de materiales peligrosos (Rew et al., 2000; Moosemiller, 2011). Los valores globales de los accidentes y las frecuencias de las diferentes modalidades de escape

también están disponibles en la literatura genérica (De Haag y Ale, 2005; Lees, 2005; EGIG, 2008; PHMSA, 2016c).

Basado en las consideraciones anteriores y con el objetivo de mejorar el conocimiento de los datos necesarios para llevar a cabo un Análisis Cuantitativo de Riesgos (ACR), los datos históricos recopilados en el Capítulo 2 se han analizado más detalladamente en el presente capítulo. El propósito ha sido construir una base sólida para estimar las probabilidades condicionales de los diferentes eventos que pueden ocurrir tras la pérdida de contención accidental de materiales peligrosos de las tuberías. Por consiguiente, se han desarrollado los árboles de eventos para las diferentes categorías de sustancias identificadas, y se han estimado las probabilidades condicionales para cada rama. La investigación también tiene como objetivo identificar, para cada tipo de pérdida de contención, la relación entre los eventos finales y las causas de fallo de las tuberías. Estas probabilidades representan parámetros fundamentales en el ACR, especialmente cuando se tiene que evaluar el riesgo generado por la presencia de una tubería –que transporta de materiales peligrosos– sobre la población potencialmente expuesta.

3.2. Procesamiento de la información

3.2.1. Clasificación de los materiales involucrados

Las propiedades de los materiales peligrosos involucrados tienen una marcada influencia sobre las consecuencias del suceso inicial. Tal y como se ha confirmado en el análisis histórico, si el fluido liberado es un gas y hay ignición inmediata, se producirá un dardo de fuego; si no hay ignición inmediata, el gas se dispersará en la atmósfera formando una nube que a su vez puede incendiarse y originar una llamarada o una explosión (esto dependerá de las condiciones meteorológicas y de si la mezcla explosiva gas-aire está entre sus límites de inflamabilidad). Por el contrario, si es un líquido, este caerá al suelo formando una balsa que puede incendiarse, dando lugar a un incendio de charco, o puede evaporarse y generar una nube sujeta a la misma evolución que para un escape de gas. Un gas licuado a presión puede comportarse de una o ambas maneras, dependiendo de sus propiedades físicas y de las condiciones de transporte.

Probabilidades de los eventos posteriores al escape de materiales peligrosos

Para estimar las probabilidades correspondientes, las sustancias identificadas (véase la Tabla 2-12 del Capítulo 2) se han agrupado en cuatro categorías: i) Gases comprimidos, ii) Gases licuados a presión, iii) Líquidos volátiles (con $T_f \leq 21^\circ\text{C}$), y iv) Líquidos con baja volatilidad (con $T_f > 21^\circ\text{C}$).

Los gases son transportados generalmente a una presión relativamente alta y pueden representar una sola clase de sustancias. En cuanto a los líquidos, puesto que en la mayoría de los casos son inflamables, estos se han distribuido en dos clases distintas, basadas en su punto de inflamación (T_f). Por último, los gases licuados a presión representan otro grupo específico de sustancias.

De acuerdo con los materiales involucrados, y con base en la clasificación anterior, se ha obtenido la distribución de los accidentes históricos reportados (Tabla 3-1). Puesto que algunos accidentes involucraron más de un material, aquí solamente se ha considerado el primer material involucrado en los eventos. Puede verse que se obtiene la siguiente distribución entre las categorías de sustancias definidas: gases comprimidos 27,4% (291 entradas), gases licuados a presión 4,6% (49 entradas), líquidos volátiles 57,3% (609 entradas) y líquidos con baja volatilidad 10,7% (114 entradas).

Tabla 3-1. Clasificación de las sustancias identificadas.

Substancia	Número de entradas	% de la categoría
<i>Gases comprimidos</i>	291	27,4
Gas natural	289	99,3
Hidrógeno	2	0,7
<i>Gases licuados a presión</i>	49	4,6
Gas licuado del petróleo (GLP)	33	67,4
Amoníaco	7	14,3
Etano	3	6,1
Etileno	2	4,1
Propileno	2	4,1
Butano	1	2,0
Monóxido de carbono	1	2,0
<i>Líquidos volátiles ($T_f \leq 21^\circ\text{C}$)</i>	609	57,3
Gasolina	303	49,8
Petróleo crudo	288	47,3
Nafta	7	1,1
Otros productos orgánicos	11	1,8
<i>Líquidos con baja volatilidad ($T_f > 21^\circ\text{C}$)</i>	114	10,7
Gasóleo	52	45,6
Combustible para aviones	48	42,1
Queroseno	14	12,3

De manera más detallada, la mayoría de los accidentes incluidos en el grupo de gases comprimidos involucraron GN (más del 99% de las entradas), mientras que el GLP (mezcla de propano y butano) representó más del 67% de los casos con gases licuados a presión; en el caso de líquidos volátiles, la gasolina (49,8%) y el petróleo crudo (47,3%) fueron los principales productos, mientras que el gasóleo (45,6%) y el combustible para aviones (42,1%) suman cerca del 90% de los casos de líquidos con baja volatilidad (Tabla 3-1).

3.2.2. Tipos de pérdida de contención

La evolución de un accidente tras la pérdida de contención y la magnitud de sus consecuencias dependen de la cantidad de material liberado que, a su vez, depende de la extensión de los daños en la tubería, del tiempo de detección del escape y del tiempo necesario para detener el flujo en la tubería (a través de válvulas de bloqueo), etc. De forma similar al procedimiento definido para las categorías de las sustancias, se han adoptado dos modalidades de pérdida de contención: a través de un orificio/perforación y por la rotura total de la tubería.

3.2.3. Causas de fallo

Las causas generales y específicas que originaron los accidentes (véase la Sección 2.4.2 del Capítulo 2), se han examinado y distribuido según las modalidades de pérdida de contención descritas en el apartado anterior. Es importante destacar que aquí se ha tenido en cuenta únicamente la causa específica inicial del fallo de la tubería.

3.3. Resultados y discusión

Se ha realizado un análisis preciso de los registros históricos de accidentes en tuberías, desarrollándose un árbol de eventos para cada categoría de las sustancias mostradas en la Tabla 3-1. Estos instrumentos de análisis cuantitativo, presentados en las Fig. 3-1 a 3-4, han permitido obtener las probabilidades de ocurrencia de los diferentes tipos de eventos finales (incendio, explosión, nube de gas) tras el escape inicial, para cada categoría de las sustancias involucradas y para cada modalidad de pérdida de contención.

En estos árboles de eventos, junto con las probabilidades condicionales, se ha incluido también el número absoluto de los accidentes correspondientes a cada

rama. Esto se ha hecho con el fin de proporcionar información detallada y para destacar la relevancia estadística de los cálculos. Como observación final, es importante subrayar que los valores de las probabilidades que se presentan a continuación podrían estar algo sobreestimados, ya que hay que dar por sentado que no se han dado a conocer (ni, por tanto, han quedado registradas) un número indeterminado de pérdidas de contención en tuberías caracterizadas por daños menores o ausencia de consecuencias.

3.3.1. Gases comprimidos

Entre los 291 escenarios que incluyen gases comprimidos, dos casos involucraron hidrógeno y 289 casos (*i.e.*, casi la totalidad de estos accidentes) GN (véase la Tabla 3-1), por lo que en realidad se podría decir que las consideraciones que figuran a continuación se refieren esencialmente al GN.

Del árbol de eventos establecido para esta categoría de sustancias (Fig. 3-1), se puede observar que el tipo más frecuente de pérdida de contención es a través de la rotura total de la tubería, con un 57,4% de probabilidad (167 entradas), seguido por la pérdida de contención a través de un orificio/perforación, con 36,4% de probabilidad (106 entradas). Solamente en 18 accidentes (6,2%) no fue posible determinar la modalidad de escape. Los dos tipos de pérdida de contención analizados muestran una baja probabilidad de ignición inmediata, con 0,341 para la rotura total y solamente 0,057 para los escapes a través de un orificio. Moosemiller (2011) proporciona un valor medio de 0,15 para la probabilidad de ignición inmediata, independientemente del tipo de pérdida de contención inflamable y de la magnitud y duración de la misma (sin embargo, el estudio no cita el origen de este valor).

Para las pérdidas de contención a través de orificios, se observa una mayor probabilidad de ignición retrasada con respecto a la rotura total de la tubería (60,9% y 37,9%, respectivamente) (Fig. 3-1); además, la probabilidad de aceleración del frente de llama es mayor para la primera modalidad de escape que para la segunda: 89,3% en escapes por un orificio y 64,1% por una rotura. Contrariamente a lo que sucede con la probabilidad de ignición inmediata, las probabilidades obtenidas para la ignición retrasada y la explosión, a partir de los datos reportados, son mucho más altas (más del doble) que las citadas por Moosemiller (2011), es decir, 0,3 y 0,2 respectivamente.

Suceso iniciador	Modalidad de pérdida de contención	Ignición inmediata	Ignición retrasada	Aceleración del frente de llama	Escenario final	Probabilidad general (*)		
Escape de gas comprimido de una tubería <i>f</i> (291 eventos)	Orificio/perforación $\bar{P}_1 = 106/291 = 0,364$	Sí $P_2 = 6/106 = 0,057$	Dardo de fuego			0,021		
		No $\bar{P}_2 = 92/106 = 0,868$	Sí $P_3 = 56/92 = 0,609$	Sí $\bar{P}_4 = 50/56 = 0,893$	VCE	$P_5 = 23/50 = 0,460$	0,079	
			No $\bar{P}_4 = 6/56 = 0,107$	VCE + dardo de fuego	$P_5 = 27/50 = 0,540$	0,093		
		No $\bar{P}_2 = 92/106 = 0,868$	No $\bar{P}_3 = 36/92 = 0,391$	Sin consecuencias			0,124	
			Sí $P_2 = 57/167 = 0,341$	Dardo de fuego			$P_5 = 27/57 = 0,474$	0,093
		Rotura total $\bar{P}_1 = 167/291 = 0,574$	No $\bar{P}_2 = 103/167 = 0,617$	Sí $P_3 = 39/103 = 0,379$	Sí $\bar{P}_4 = 25/39 = 0,641$	Bola de fuego + dardo de fuego	$P_5 = 30/57 = 0,526$	0,103
	No $\bar{P}_4 = 14/39 = 0,359$			VCE	$P_5 = 15/25 = 0,600$	0,052		
	No $\bar{P}_2 = 103/167 = 0,617$		No $\bar{P}_3 = 64/103 = 0,621$	Sin consecuencias			0,220	
			Sí $P_2 = 0/18 = 0,000$	Dardo de fuego			$P_5 = 0/0 = 0,000$	0,000
	Desconocida $\bar{P}_1 = 18/291 = 0,062$		No $\bar{P}_2 = 16/18 = 0,889$	Sí $P_3 = 13/16 = 0,813$	Sí $\bar{P}_4 = 13/13 = 1,000$	Bola de fuego, dardo de fuego	$P_5 = 0/0 = 0,000$	0,000
				No $\bar{P}_4 = 0/13 = 0,000$	VCE	$P_5 = 9/13 = 0,692$	0,031	
		No $\bar{P}_2 = 16/18 = 0,889$	No $\bar{P}_3 = 3/16 = 0,187$	Sin consecuencias			0,010	
			Sí $P_3 = 13/16 = 0,813$	Sí $\bar{P}_4 = 13/13 = 1,000$	VCE + dardo de fuego	$P_5 = 4/13 = 0,308$	0,014	
		No $\bar{P}_2 = 16/18 = 0,889$	No $\bar{P}_3 = 3/16 = 0,187$	Sin consecuencias			0,000	
			Sí $P_3 = 13/16 = 0,813$	Sí $\bar{P}_4 = 13/13 = 1,000$	Llamarada, dardo de fuego	$P_5 = 0/0 = 0,000$	0,000	

(*) Las probabilidades no suman uno, ya que se desconoce si hubo o no ignición en 17 eventos (8 en escape por un orificio, 7 en rotura total y 2 en modalidad de escape desconocida).

Fig. 3-1. Árbol de eventos para la pérdida de contención de gases comprimidos inflamables de una tubería.

Probabilidades de los eventos posteriores al escape de materiales peligrosos

La Tabla 3-2 presenta las probabilidades de ocurrencia de los posibles eventos finales que se producen después del escape de un gas comprimido (explosión de nube de gas, dardo de fuego, etc.). Las columnas 2, 3 y 4 muestran las probabilidades asociadas a cada tipo de pérdida de contención (escape por un orificio, rotura total y modalidad desconocida), mientras que la última columna muestra las probabilidades generales para todas las pérdidas de contención de gases comprimidos, independientemente de la modalidad. Es preciso señalar que, dado que en algunos accidentes ocurrió más de un evento final, las probabilidades de cada columna suman más de uno.

Tabla 3-2. Probabilidades totales para cada evento final de los accidentes en tuberías con gases comprimidos.

Evento final	Modalidad de pérdida de contención			Probabilidad general
	Orificio (0,364)	Rotura total (0,574)	Desconocida (0,062)	
Dardo de fuego	0,358	0,419	0,222	0,385
Bola de fuego	0,0	0,18	0,0	0,103
Incendio de llamarada	0,056	0,084	0,0	0,068
Explosión de nube (VCE)	0,472	0,15	0,722	0,303
Sin consecuencias	0,34	0,383	0,166	0,354

La suma de las probabilidades de cada columna es mayor que uno, ya que algunos accidentes presentaron más de un evento final.

La combinación de todas las probabilidades condicionales así registradas proporciona una probabilidad final para una explosión de nube de gas (con o sin un dardo de fuego simultáneo) de 0,472 en los casos de pérdida de contención por un orificio, y de 0,15 por una rotura total (Tabla 3-2). Dado que el tamaño de la sección de escape de una rotura total es mayor respecto a los orificios más pequeños, este resultado contrasta con lo sugerido por Cox et al. (1990), quienes afirman que la probabilidad de ignición aumenta con el caudal del escape. Una posible explicación del presente resultado podrían ser los tiempos de detección más largos en el caso de pequeños escapes, comparados con los de los accidentes más graves, que, a su vez, dependiendo de las condiciones meteorológicas, pueden finalmente dar lugar a una mayor cantidad de gas inflamable en la nube.

Tomando en consideración las probabilidades generales (Tabla 3-2), entre todos los eventos peligrosos el dardo de fuego es el más probable (38,5% de ocurrencia, comparado con el 30,3% de ocurrencia de una explosión de nube de gas o el 6,8% de un incendio de llamarada), ya sea derivado de la ignición

inmediata del gas liberado o formado después de otro evento peligroso anterior, como por ejemplo un incendio de nube (llamarada) o una explosión de nube de gas.

En el caso de una rotura total, si inmediatamente después del escape de un gas no se genera una bola de fuego, entonces se podría esperar la dispersión segura del gas liberado. De acuerdo con la Tabla 3-2, las bolas de fuego no son muy frecuentes (10,3% de probabilidad) y están asociadas únicamente a la ignición inmediata del gas después de la rotura de la tubería.

En los casos en que no hubo ignición, es decir, sin consecuencias, la probabilidad de que el gas inflamable liberado se disperse es muy similar en ambos tipos de pérdida de contención: 0,34 para el escape de gas a través de un orificio y 0,383 para una rotura total. De manera general, en más de un tercio de todos los casos (específicamente en el 35,4%) no hubo consecuencias peligrosas.

Por último, se puede observar en la Fig. 3-1 que las probabilidades condicionales de los eventos a lo largo de las ramas correspondientes al tipo de escape desconocido, son muy similares a las que caracterizan a los escapes por un orificio; esta consideración, junto con el hecho de que la mayoría de los registros de accidentes analizados no especifican el tamaño de la abertura, sugiere que estos casos podrían asociarse con la categoría «pérdida de contención por un orificio». De manera similar a esa categoría, la probabilidad de una VCE es alta (0,722).

En lo referente a las causas, no fue posible identificar la causa general en el 39,2% de los casos examinados en esta categoría (Tabla 3-3), independientemente de su severidad. De los casos donde se conoce la causa, el 27,2% tuvo como causa general la actividad de terceros (32,1% en los escapes por un orificio y 26,3% por rotura total), con daños por maquinaria de excavación como causa específica en la mayoría de ellos (85,3% y 75,0%, respectivamente). Estos resultados concuerdan con informes anteriores (Hansler et al., 2011; EGIG, 2015) basados principalmente en datos del Grupo Europeo de datos de Accidentes de Tuberías (EGIG, por sus siglas en inglés) y la firma británica British Gas.

Probabilidades de los eventos posteriores al escape de materiales peligrosos

Tabla 3-3. Distribución de las causas generales y específicas de fallo de las tuberías, según la modalidad de pérdida de contención de gases comprimidos.

Causa general y específica	Modalidad de pérdida de contención					
	Orificio		Rotura total		Desconocida	
	No. de entradas	%	No. de entradas	%	No. de entradas	%
<i>Actividades de terceros</i>	34	32,1	44	26,3	1	5,6
Maquinaria de excavación	29	85,3	33	75,0	-	-
Vehículo/otro equipo no relacionado con excavación	4	11,8	8	18,2	-	-
Tráfico fluvial	-	-	-	-	1	100,0
Cargas pesadas	-	-	2	4,5	-	-
Causa específica desconocida	1	2,9	1	2,3	-	-
<i>Corrosión</i>	3	2,8	25	15,0	0	0,0
Externa	1	33,3	13	52,0	-	-
Interna	1	33,3	4	16,0	-	-
Corrosión bajo tensión	1	33,3	8	32,0	-	-
<i>Fallos mecánicos</i>	5	4,7	18	10,8	0	0,0
Fallo de soldadura	2	40,0	-	-	-	-
Defecto del material	-	-	1	5,6	-	-
Sobrepresión	-	-	8	44,4	-	-
Defecto de construcción	-	-	2	11,1	-	-
Envejecimiento	1	20,0	2	11,1	-	-
Causa específica desconocida	2	40,0	5	27,8	-	-
<i>Errores humanos/operativos</i>	11	10,4	11	6,6	0	0,0
Mantenimiento	5	45,5	5	45,5	-	-
Reparación/reemplazo	3	27,3	4	36,4	-	-
Puesta en marcha	-	-	1	9,1	-	-
Operaciones generales	1	9,1	-	-	-	-
Operación de válvula	1	9,1	-	-	-	-
Apagado	-	-	1	9,1	-	-
Causa específica desconocida	1	9,1	-	-	-	-
<i>Peligros naturales</i>	8	7,5	8	4,8	0	0,0
Deslizamiento de tierra	6	75,0	4	50,0	-	-
Inundación	-	-	2	25,0	-	-
Relámpago	1	12,5	1	12,5	-	-
Causa específica desconocida	1	12,5	1	12,5	-	-
<i>Fallos del equipo</i>	6	5,7	3	1,8	0	0,0
Brida	1	16,7	-	-	-	-
Válvula	4	66,7	1	33,3	-	-
Bomba/compresor	1	16,7	-	-	-	-
Otros	-	-	1	33,3	-	-
Causa específica desconocida	-	-	1	33,3	-	-
<i>Causa general desconocida</i>	39	36,8	58	34,7	17	94,4
Total	106	100,0	167	100,0	18	100,0

El porcentaje restante de los accidentes se originaron por causas distribuidas en cierto modo de manera equitativa entre el resto de las causas generales (Tabla 3-3), lo que contrasta parcialmente con lo afirmado Jo y Ahn (2005), quienes encontraron una mayor influencia de los fallos mecánicos y la corrosión. De manera similar, Wang y Duncan (2014) identificaron los fallos mecánicos como la principal causa de escapes pequeños (orificios), mientras que para otro tipo de escapes encontraron que las fuerzas externas y los fallos mecánicos tienen prácticamente la misma probabilidad. A pesar de que estos autores no distinguen específicamente entre el tipo fuerzas exteriores (*i.e.*, ya sean naturales o antropogénicas), si consideraran preferentemente las causas asociadas a la actividad humana. Por lo tanto, una de las posibles razones de la discrepancia entre los resultados obtenidos aquí y los reportados por Wang y Duncan, puede encontrarse en una de sus observaciones: «*las tuberías de transmisión en Europa atraviesan terrenos mucho más urbanizados y desarrollados que los encontrados en los Estados Unidos*»; aunque esta declaración se refería inicialmente a la diferencia en las tasas de fallo de las tuberías entre Europa y los Estados Unidos, parece lógico que se pueda aplicar igualmente a las causas originarias de las pérdidas de contención en tuberías.

Cabe destacar que los errores humanos/operativos, a los que con frecuencia se les atribuye la responsabilidad de los accidentes registrados, apenas superan el 8% de los casos analizados entre ambas modalidades de escape; la mayoría de los accidentes ocurrieron específicamente durante las actividades de mantenimiento y en operaciones de reparación/reemplazo (Tabla 3-3).

3.3.2. Gases licuados a presión

Respecto a los escapes de gases licuados a presión, estos ocurren mayormente a través de un orificio (53% de los casos) y, en menor medida, por una rotura total (38,8%) (Fig. 3-2). Se desconoce la modalidad de pérdida de contención en 4 registros de accidentes históricos confirmados.

Al igual que en gases comprimidos, la ignición inmediata de los escapes continuos de gas licuado a presión es poco probable, sobre todo para los escapes a través de un orificio (0,077) (Fig. 3-2); en general, la probabilidad de ignición inmediata es de 0,2, ligeramente mayor al valor medio (0,15) reportado en la literatura (Moosemiller, 2011).

Probabilidades de los eventos posteriores al escape de materiales peligrosos

Suceso iniciador	Modalidad de pérdida de contención	Ignición inmediata	Ignición retrasada	Aceleración del frente de llama	Escenario final	Probabilidad general ^(b)		
Escape de gas licuado a presión de una tubería <i>f</i> (49 eventos)	Orificio/perforación (Escape continuo = escape bifásico) $\bar{P}_1 = 26/49 = 0,530$	Sí			Dardo de fuego	$P_5 = 1/2 = 0,500$	0,020	
		$\bar{P}_2 = 2/26 = 0,077$			Dardo de fuego + inc. charco	$P_5 = 1/2 = 0,500$	0,020	
				Sí	Sí	VCE + (inc. charco)	$P_5 = 4/6 = 0,667$	0,082
					$P_4 = 6/10 = 0,600$	VCE + dardo de fuego + (inc. charco)	$P_5 = 2/6 = 0,333$	0,041
			Sí	$\bar{P}_3 = 10/20 = 0,500$	No	Llamarada + (inc. charco)	$P_5 = 2/4 = 0,500$	0,041
					$\bar{P}_4 = 4/10 = 0,400$	Llamarada + dardo de fuego + inc. charco	$P_5 = 2/4 = 0,500$	0,041
		No		No		Sin consecuencias ^(a)		0,204
		$\bar{P}_2 = 20/26 = 0,769$		$\bar{P}_3 = 10/20 = 0,500$				
			Sí			Dardo de fuego	$P_5 = 4/7 = 0,571$	0,082
			$\bar{P}_2 = 7/19 = 0,368$			Dardo de fuego + inc. charco	$P_5 = 1/7 = 0,143$	0,020
						Bola de fuego + dardo de fuego+(inc. charco)	$P_5 = 2/7 = 0,286$	0,041
					Sí	VCE + (inc. charco)	$P_5 = 1/7 = 0,143$	0,021
			Sí	$\bar{P}_4 = 7/9 = 0,778$	VCE + dardo de fuego + (inc. charco)	$P_5 = 6/7 = 0,857$	0,122	
				No	Llamarada + (inc. charco)	$P_5 = 1/2 = 0,500$	0,020	
		No		$\bar{P}_4 = 2/9 = 0,222$	Llamarada + dardo de fuego + (inc. charco)	$P_5 = 1/2 = 0,500$	0,020	
	$\bar{P}_1 = 19/49 = 0,388$	$\bar{P}_2 = 12/19 = 0,632$	No		Sin consecuencias ^(a)		0,061	
			$\bar{P}_3 = 3/12 = 0,250$					
		Sí			Dardo de fuego + (inc. charco)	$P_5 = 0/0 = 0,000$	0,000	
		$\bar{P}_2 = 0/4 = 0,000$			Bola de fuego, dardo de fuego + (inc. charco)	$P_5 = 0/0 = 0,000$	0,000	
					VCE + (inc. charco)	$P_5 = 0/0 = 0,000$	0,000	
			Sí	$\bar{P}_4 = 0/0 = 0,000$	VCE, dardo de fuego + (inc. charco)	$P_5 = 0/0 = 0,000$	0,000	
			$\bar{P}_3 = 0/2 = 0,000$	No	Llamarada + (inc. charco)	$P_5 = 0/0 = 0,000$	0,000	
				$\bar{P}_4 = 0/0 = 0,000$	Llamarada, dardo de fuego + (inc. charco)	$P_5 = 0/0 = 0,000$	0,000	
		No			Sin consecuencias ^(a)		0,041	
	$\bar{P}_2 = 2/4 = 0,500$	No	$\bar{P}_3 = 2/2 = 1,000$					
	Desconocida							
	$\bar{P}_1 = 4/49 = 0,082$							

^(a) Ocurrió dispersión de nube tóxica en los casos en los que el material liberado tenía propiedades tóxicas.

^(b) Las probabilidades no suman uno, ya que se desconoce si hubo o no ignición en 6 eventos (4 en escape por un orificio y 2 en modalidad de escape desconocida).

Fig. 3-2. Árbol de eventos para la pérdida de contención de gases tóxicos e inflamables, licuados a presión de una tubería.

Si la nube inflamable se dispersa, la probabilidad de ignición (retrasada) es igual a la probabilidad de no ignición para los escapes por un orificio, siendo mayor en los escapes por una rotura total (0,75) (Fig. 3-2); una vez que la nube de gas se incendia, existe una mayor probabilidad de que ocurra una explosión en lugar de una «simple» llamarada en ambos tipos de escape: 0,6 vs. 0,4 en los escapes por un orificio y 0,778 vs. 0,222 por una rotura total. Por razones de precisión, debe observarse que el número absoluto de eventos en los cuales se basa la estimación de la probabilidad final es más bien bajo (49 eventos), por lo que estas conclusiones deben tomarse con cautela. Con esta advertencia en mente, y al igual que con los gases comprimidos, los escapes de gases licuados a presión presentan mayor probabilidad de ignición retrasada respecto a la ignición inmediata, en ambas modalidades de pérdida de contención.

La Tabla 3-4 muestra las probabilidades de ocurrencia de los eventos accidentales finales para gases licuados a presión. Puede observarse que una pérdida de contención accidental tiene una probabilidad promedio de 30,6% de terminar de manera segura (*i.e.*, sin ignición). Sin embargo, cabe señalar que el término «sin ignición» no necesariamente significa «sin consecuencias», ya que algunas de las sustancias incluidas en esta categoría pueden tener, además de propiedades inflamables, propiedades tóxicas (*e.g.*, el amoníaco); por lo tanto, en estos casos, «sin consecuencias» es sinónimo de «dispersión de nube tóxica», que se caracteriza generalmente por tener áreas de impacto mayores que los incendios y las explosiones. Este no fue el caso de los gases comprimidos, donde solamente estaban involucrados el GN y el hidrógeno.

Tabla 3-4. Probabilidades totales para cada evento final de los accidentes en tuberías con gases licuados a presión.

Evento final	Modalidad de pérdida de contención			Probabilidad general
	Orificio (0,530)	Rotura total (0,388)	Desconocida (0,082)	
Dardo de fuego + (incendio de charco)	0,231	0,737	0,0	0,407
Bola de fuego	0,0	0,105	0,0	0,041
Incendio de llamarada	0,154	0,105	0,0	0,122
Explosión de nube (VCE)	0,231	0,368	0,0	0,266
Sin consecuencias	0,385	0,158	0,5	0,306

La suma de las probabilidades en algunas columnas es mayor que uno, ya que algunos accidentes presentaron más de un evento.

Considerando todas las posibles evoluciones de los accidentes entre los eventos peligrosos finales, el dardo de fuego es con diferencia el evento más probable en los escapes por rotura total (0,737), seguido por la explosión de nubes de gas (0,368); en los escapes por un orificio, el dardo de fuego y la explosión de una nube de gas son igualmente probables (0,231), pero con una probabilidad mucho menor respecto a los escapes mayores (Tabla 3-4). Asimismo, tras el escape de un gas licuado a presión puede ocurrir una vaporización más o menos completa del líquido liberado; en consecuencia, la ignición local del escape (ya sea inmediata o retrasada) puede dar lugar tanto a un dardo de fuego y a un incendio de charco, dependiendo del fluido y de sus condiciones de transporte.

Respecto a los accidentes en los que se desconoce la modalidad de pérdida de contención, el número de casos es muy bajo como para extraer conclusiones significativas desde el punto de vista estadístico.

En general, la información analizada permite concluir que, en los escapes de gases licuados a presión, existe una mayor probabilidad (40,7%) de que el accidente concluya con daños locales (dardo de fuego e incendio de charco) en lugar de sin eventos peligrosos (30,6%) (sin considerar la posibilidad de una dispersión tóxica) (Tabla 3-4); además, existe una probabilidad del 26,6% de generar un impacto mayor por la explosión de una nube (VCE).

Aunque esta categoría de materiales presenta un número limitado de casos registrados, en la Tabla 3-5 se presenta la tendencia general relacionada con las causas exclusivas de los accidentes. Se ha encontrado que la causa más común en ambas modalidades de pérdida de contención está asociada a las actividades de terceros (23,1% en los escapes a través de un orificio y 31,6 por una rotura total), particularmente por daños con maquinaria de excavación (66,6% y 100% de la causa general, respectivamente), aunque también los fallos mecánicos tienen una importante contribución (15,4% en escapes por un orificio y 21,1% por una rotura). Únicamente se registraron accidentes causados por corrosión en los escapes por un orificio (15,4% de los casos). El resto de las causas generales presentan una distribución prácticamente igual en ambos tipos de pérdida de contención.

Tabla 3-5. Distribución de las causas generales y específicas de fallo de las tuberías, según la modalidad de pérdida de contención de gases licuados a presión.

Causa general y específica	Modalidad de pérdida de contención					
	Orificio		Rotura total		Desconocida	
	No. de entradas	%	No. de entradas	%	No. de entradas	%
<i>Actividades de terceros</i>	6	23,1	6	31,6	0	0,0
Maquinaria de excavación	4	66,6	6	100,0	-	-
Vehículo/otro equipo no relacionado con excavación	1	16,7	-	-	-	-
Tráfico fluvial	1	16,7	-	-	-	-
<i>Corrosión</i>	4	15,4	0	0,0	0	0,0
Externa	2	50,0	-	-	-	-
Interna	1	25,0	-	-	-	-
Corrosión bajo tensión	1	25,0	-	-	-	-
<i>Fallos mecánicos</i>	4	15,4	4	21,1	0	0,0
Fallo de soldadura	2	50,0	2	50,0	-	-
Sobrepresión		0,0	1	25,0	-	-
Defecto de construcción	1	25,0	1	25,0	-	-
Causa específica desconocida	1	25,0	-	-	-	-
<i>Errores humanos/operativos</i>	1	3,8	2	10,5	0	0,0
Mantenimiento	1	100,0	1	50,0	-	-
Reparación/reemplazo		0,0	1	50,0	-	-
<i>Peligros naturales</i>	1	3,8	2	10,5	0	0,0
Deslizamiento de tierra y fuertes lluvias	-	-	1	50,0	-	-
Inundación	1	100,0	-	-	-	-
Relámpago	-	-	1	50,0	-	-
<i>Fallos del equipo</i>	2	7,7	1	5,3	0	0,0
Válvula	2	100,0	1	100,0	-	-
<i>Causa general desconocida</i>	8	30,8	4	21,1	4	100,0
Total	26	100,0	19	100,0	4	100,0

3.3.3. Líquidos volátiles

Los líquidos volátiles representan la categoría de sustancias con el mayor número de accidentes registrados (609 casos); el árbol de eventos correspondiente se muestra en la Fig. 3-3. Dado el bajo número de registros en los cuales se desconoce la modalidad de pérdida de contención (solo 7 de 609), las dos modalidades de escape consideradas cubren prácticamente todo el conjunto de registros analizados en esta categoría: los escapes de líquidos volátiles a través de un orificio tienen una probabilidad de ocurrencia de 0,755 y de 0,233 por una rotura total.

Al igual que en las dos anteriores categorías de materiales, la ignición inmediata del escape de un líquido volátil es poco probable: concretamente, 0,7% de probabilidad en los escapes por orificios y 4,9% por una rotura (Fig. 3-3). La probabilidad promedio de ignición inmediata es ahora de 0,017, mucho menor que en las anteriores categorías de sustancias y también que el valor medio de 0,15 reportado en la literatura (Moosemiller, 2011). Esto sugiere que este último valor debería considerarse mejor para referirse a gases y líquidos que experimentan vaporización súbita (*flashing*), en lugar de combustibles líquidos. Por otro lado, el valor de 0,065 que proporciona el manual BEVI (National Institute of Public Health and the Environment [RIVM], 2009) referente a las sustancias de Categoría 1 (altamente inflamables, con $T_f < 21$ °C), es más cercano a la probabilidad de ignición directa calculada aquí para un escenario de rotura total (0,051).

La ignición retrasada es también poco probable en ambas modalidades de escape, siendo 9,6% la probabilidad en los escapes a través de un orificio y 12,3% a través de una rotura total. A pesar de la baja probabilidad de ocurrencia en ambas modalidades de escape, una ignición retrasada puede dar lugar a accidentes graves. Esto ocurrió en 30 de los 59 eventos en los que aconteció este tipo de ignición (Fig. 3-3), los cuales registraron la explosión de una nube de gas, correspondiente a una probabilidad final de 5%.

En la Tabla 3-6 se puede observar que, al igual que se ha encontrado en gases comprimidos, la probabilidad general de ocurrencia de una explosión de nube para líquidos volátiles es mayor en los escapes a través de un orificio (0,062) que por una rotura total (0,015); por lo tanto, aquí también se pueden aplicar las mismas consideraciones hechas para gases comprimidos sobre el tiempo de detección de las pérdidas de contención. Se puede observar también que las probabilidades generales de ocurrencia de una explosión de nube y de una «simple» llamarada son bastante similares entre sí (0,049 y 0,047, respectivamente), pero son mucho más bajas si se comparan con las probabilidades de los gases comprimidos y los gases licuados a presión; esto puede explicarse por la baja cantidad de vapores generados tras el escape de un líquido volátil (en comparación con un gas comprimido o licuado a presión), que es uno de los requisitos previos para la generación de una explosión de nube de vapor.

Suceso iniciador	Modalidad de pérdida de contención	Ignición inmediata	Ignición retrasada	Aceleración del frente de llama	Escenario final	Probabilidad general (*)							
Escape de líquido volátil de una tubería f(609 eventos)	Orificio/perforación P ₁ = 460/609 = 0,755	Sí	No	No	Dardo de fuego	P ₅ = 1/3 = 0,333	0,002						
		P ₂ = 3/460 = 0,007			Incendio de charco	P ₅ = 2/3 = 0,667	0,003						
		No			P ₂ = 448/460 = 0,974	No	P ₂ = 448/460 = 0,974	VCE	P ₅ = 8/28 = 0,286	0,013			
								Sí	VCE + dardo de fuego	P ₅ = 6/28 = 0,214	0,010		
								P ₃ = 43/448 = 0,096	Sí	VCE + incendio de charco	P ₅ = 11/28 = 0,393	0,018	
									P ₄ = 28/43 = 0,651	VCE + incendio desconocido	P ₅ = 3/28 = 0,107	0,005	
										No	Llamarada	P ₅ = 7/15 = 0,467	0,011
									P ₄ = 15/43 = 0,349	Llamarada + incendio de charco	P ₅ = 8/15 = 0,533	0,013	
		Daño ambiental				0,665							
		Rotura total P ₁ = 142/609 = 0,233			Sí	No	No	No	Dardo de fuego	P ₅ = 4/7 = 0,571	0,007		
					P ₂ = 7/142 = 0,049				Incendio de charco	P ₅ = 3/7 = 0,429	0,005		
					No				P ₂ = 130/142 = 0,915	No	P ₂ = 130/142 = 0,915	Sí	VCE + (dardo de fuego)
	P ₃ = 16/130 = 0,123		Sí	VCE + incendio de charco								P ₅ = 1/2 = 0,500	0,002
			P ₄ = 2/16 = 0,125	VCE + incendio desconocido								P ₅ = 1/2 = 0,500	0,002
				No								Llamarada	P ₅ = 11/14 = 0,786
			P ₄ = 14/16 = 0,875	Llamarada + incendio de charco								P ₅ = 3/14 = 0,214	0,005
	Daño ambiental											0,187	
	Desconocida P ₁ = 7/609 = 0,012		Sí	No	No				No	Dardo de fuego	P ₅ = 0/1 = 0,000	0,000	
			P ₂ = 1/7 = 0,143							Incendio de charco	P ₅ = 1/1 = 1,000	0,002	
			P ₃ = 0/4 = 0,000							Sí	VCE + (dardo de fuego)	P ₅ = 0/0 = 0,000	0,000
										P ₄ = 0/0 = 0,000	VCE + incendio de charco	P ₅ = 0/0 = 0,000	0,000
		No				Llamarada	P ₅ = 0/0 = 0,000	0,000					
		P ₄ = 0/0 = 0,000				Llamarada + incendio de charco	P ₅ = 0/0 = 0,000	0,000					
	Daño ambiental			0,007									

(*) Las probabilidades no suman uno, ya que se desconoce si hubo o no ignición en 16 eventos (9 en escape por un orificio, 5 en rotura total y 2 en modalidad de escape desconocida).

Fig. 3-3. Árbol de eventos para la pérdida de contención de líquidos volátiles e inflamables de una tubería.

Probabilidades de los eventos posteriores al escape de materiales peligrosos

Tabla 3-6. Probabilidades totales para cada evento final de los accidentes en tuberías con líquidos volátiles.

Evento final	Modalidad de pérdida de contención			Probabilidad general
	Orificio (0,755)	Rotura total (0,233)	Desconocida (0,012)	
Dardo de fuego	0,016	0,029	0,0	0,018
Incendio de charco	0,047	0,051	0,2	0,048
Incendio de llamarada	0,033	0,102	0,0	0,047
Explosión de nube (VCE)	0,062	0,015	0,0	0,049
Sin consecuencias	0,898	0,832	0,8	0,859

La suma de las probabilidades en algunas columnas es mayor que uno, ya que algunos accidentes presentaron más de un evento.

A pesar de la alta volatilidad de las substancia, las pérdidas de contención de líquidos volátiles se caracterizan por la presencia de un charco y una baja cantidad de vapores generados inmediatamente después del escape. En consecuencia, se puede esperar que los incendios de charco ocurran de manera frecuente en esta categoría. De hecho, la Tabla 3-6 muestra que el incendio de charco es el tipo de incendio más común. Además, como ya se ha destacado, dependiendo de las condiciones del escape y de las características de la zona del evento, el charco puede desplazarse lejos del sitio del escape antes de incendiarse y posteriormente encontrar una fuente de ignición, dando lugar a un incendio en el charco del líquido migrado. Sin embargo, debido a la falta de precisión de la información sobre la evolución de los eventos en los accidentes registrados, estas dos condiciones (incendio local del charco e incendio de charco de líquido migrado) no se han analizado aquí.

Al comparar los dos tipos de pérdida de contención, se puede observar que, en los casos de rotura total, la mayoría de los eventos finales peligrosos tienen una probabilidad de ocurrencia más alta (Tabla 3-6), debido a la gran cantidad de material que se libera por esta modalidad de escape. Por último, como consecuencia de la baja cantidad de vapores generados inmediatamente después de la pérdida de contención un líquido volátil, el dardo de fuego es ahora el evento menos frecuente en ambos tipos de escape.

En general, se observó una conclusión del accidente «sin consecuencias» en el 85,9% de los casos analizados (Tabla 3-6). Sin embargo, es importante señalar que, en estos casos sin eventos peligrosos, el material liberado provocó afectaciones al medio ambiente (contaminación del suelo y posiblemente del

Capítulo 3

subsuelo, así como de cuerpos de agua superficiales) (véase la Sección 2.4.7, inciso b) del Capítulo 2).

Para esta categoría de materiales peligrosos se observaron diferentes tendencias respecto a las causas exclusivas de los escapes, dependiendo de su tamaño (Tabla 3-7). En los escapes por orificios, las actividades de terceros siguen siendo los eventos de causalidad predominantes, con poco más del 30% de las causas generales, especialmente durante los trabajos de excavación con maquinaria. La segunda causa más frecuente es la corrosión (cerca del 20%), generada principalmente por agentes externos (más del 50% de la causa general). Los fallos mecánicos se asocian más frecuentemente a defectos materiales y fallos de la soldadura (56,3% de la causa general), mientras que las causas específicas restantes representan menos del 13% cada una.

Tabla 3-7. Distribución de las causas generales y específicas de fallo de las tuberías, según la modalidad de pérdida de contención de líquidos volátiles.

Causa general y específica	Modalidad de pérdida de contención					
	Orificio		Rotura total		Desconocida	
	No. de entradas	%	No. de entradas	%	No. de entradas	%
<i>Actividades de terceros</i>	140	30,4	21	14,8	0	0,0
Maquinaria de excavación	101	72,1	15	71,4	-	-
Vehículo/otro equipo no relacionado con excavación	23	16,4	5	23,8	-	-
Tráfico fluvial	-	-	1	4,8	-	-
Cargas pesadas	1	0,7	-	-	-	-
Líneas de alta tensión	1	0,7	-	-	-	-
Causa específica desconocida	14	10,0	-	-	-	-
<i>Corrosión</i>	89	19,3	17	12,0	0	0,0
Externa	47	52,8	6	35,3	-	-
Interna	17	19,1	9	52,9	-	-
Corrosión bajo tensión	2	2,2	1	5,9	-	-
Causa específica desconocida	23	25,8	1	5,9	-	-
<i>Fallos mecánicos</i>	55	12,0	29	20,4	1	14,3
Fallo de soldadura	19	34,5	5	17,2	-	-
Fallo de soldadura y envejecimiento	1	1,8	-	-	-	-
Defecto del material	11	20,0	4	13,8	1	100,0
Sobrepresión	-	-	7	24,1	-	-
Defecto de construcción	7	12,7	2	6,9	-	-
Envejecimiento	6	10,9	2	6,9	-	-
Fallo en estructura de soporte	1	1,8	-	-	-	-
Causa específica desconocida	10	18,2	9	31,0	-	-
<i>Errores humanos/operativos</i>	26	5,7	6	4,2	0	0,0

Probabilidades de los eventos posteriores al escape de materiales peligrosos

Causa general y específica	Modalidad de pérdida de contención					
	Orificio		Rotura total		Desconocida	
	No. de entradas	%	No. de entradas	%	No. de entradas	%
Mantenimiento	5	19,2	3	50,0	-	-
Reparación/reemplazo	11	42,3	1	16,7	-	-
Puesta en marcha	2	7,7	1	16,7	-	-
Operaciones generales	1	3,8	1	16,7	-	-
Desmantelamiento	3	11,5	-	-	-	-
Operación de válvula	1	3,8	-	-	-	-
Roscado en caliente (<i>hot tapping</i>)	1	3,8	-	-	-	-
Operación de pigging	1	3,8	-	-	-	-
Causa específica desconocida	1	3,8	-	-	-	-
<i>Peligros naturales</i>	18	4,0	15	10,6	0	0,0
Deslizamiento de tierra	5	27,8	9	60,0	-	-
Deslizamiento de tierra y fuertes lluvias	-	-	1	6,7	-	-
Inundación	5	27,8	4	26,7	-	-
Relámpago	2	11,1	-	-	-	-
Fuertes lluvias	2	11,1	1	6,7	-	-
Bajas temperaturas	1	5,6	-	-	-	-
Erosión	1	5,6	-	-	-	-
Causa específica desconocida	2	11,1	-	-	-	-
<i>Fallos del equipo</i>	25	5,4	4	2,8	2	28,6
Brida	10	40,0	1	25,0	-	-
Válvula	5	20,0	-	-	-	-
Bomba/compresor	2	8,0	2	50,0	-	-
Otros	3	12,0	1	25,0	-	-
Causa específica desconocida	5	20,0	-	-	2	100,0
<i>Causa general combinada</i>	1	0,2	2	1,4	0	0,0
Maquinaria de excavación y sobrepresión	1	100,0	-	-	-	-
Sobrepresión y corrosión interna	-	-	1	50,0	-	-
Defecto del material y corrosión bajo tensión	-	-	1	50,0	-	-
<i>Causa general desconocida</i>	106	23,0	48	33,8	4	57,1
Total	460	100,0	142	100,0	7	100,0

De modo diferente, en el caso de las 142 roturas analizadas se ha observado una distribución más uniforme de las causas (Tabla 3-7). Omitiendo un tercio de estos casos en los que no ha sido posible identificar la causa inicial, las causas más comunes son los fallos mecánicos (20,4%) y las actividades de terceros (14,8%), pero también la corrosión y los peligros naturales (12,0% y 10,6%, respectivamente). Una vez más, los errores humanos/operativos han resultado ser

menos frecuentes de lo que se podría esperar, con menos del 6% en cada una de las modalidades de escape, con una mayor frecuencia de errores durante las operaciones de reparación y de mantenimiento como causas específicas.

3.3.4. Líquidos con baja volatilidad

Del árbol de eventos desarrollado para esta categoría de sustancias (Fig. 3-4), al igual que en los líquidos volátiles, se puede observar que la modalidad más frecuente de pérdida de contención es a través de un orificio (86,8%).

Suceso iniciador	Modalidad de pérdida de contención	Ignición inmediata	Ignición retrasada	Escenario final	Probabilidad general (*)			
Escape de líquido de baja volatilidad de una tubería <i>f</i> (114 eventos)	Orificio/ perforación $P_1 = 99/114 = 0,868$	Sí $P_2 = 5/99 = 0,051$		Dardo de fuego	$P_3 = 1/5 = 0,200$	0,009		
				Incendio de charco	$P_3 = 4/5 = 0,800$	0,035		
		No $P_2 = 93/99 = 0,939$	Sí $P_3 = 1/93 = 0,011$		Incendio de charco		0,009	
			No $P_3 = 92/93 = 0,989$		Sin consecuencias		0,807	
	Rotura total $\bar{P}_1 = 15/114 = 0,132$	Sí $P_2 = 2/15 = 0,133$			Incendio de charco		0,018	
					Incendio de charco		0,009	
		No $\bar{P}_2 = 13/15 = 0,867$	Sí $P_3 = 1/13 = 0,077$			Incendio de charco		0,009
			No $P_3 = 12/13 = 0,923$			Sin consecuencias		0,105

(*) Las probabilidades no suman uno, ya que se desconoce si hubo o no ignición en un evento de pérdida de contención por un orificio.

Fig. 3-4. Árbol de eventos para la pérdida de contención de líquidos inflamables de baja volatilidad de una tubería.

Dadas las propiedades físicas de las sustancias pertenecientes a esta categoría, no se espera que haya una cantidad significativa de vapores capaces de generar un evento peligroso tras la ignición, tal como el incendio de una nube (llamada) o una explosión (VCE), incluso en caso de un vertido de larga duración. De hecho, en los registros históricos analizados no se ha reportado ninguno de estos eventos (Fig. 3-4). Por el contrario, se registraron incendios de charco generados por las pérdidas de contención, ya sea en la proximidad de la zona del escape o

Probabilidades de los eventos posteriores al escape de materiales peligrosos

en una ubicación diferente debido a la migración del líquido. Sin embargo, la probabilidad de ocurrencia de este tipo de incendios es muy baja.

La Tabla 3-8 presenta las probabilidades de ocurrencia de los eventos finales que se han producido después del escape de un líquido de baja volatilidad. Un dardo de fuego tiene una probabilidad general de ocurrencia del 1% (producido prácticamente en uno de cada 114 accidentes), mientras que la probabilidad de un incendio de charco es superior al 7%. Por otro lado, una pérdida de contención, independientemente del modo de escape, tiene una probabilidad de 0,912 de finalizar «sin consecuencias».

Tabla 3-8. Probabilidades totales para cada evento final de los accidentes en tuberías con líquidos de baja volatilidad.

Evento final	Modalidad de pérdida de contención		Probabilidad general
	Orificio (0,868)	Rotura total (0,132)	
Dardo de fuego	0,01	0,0	0,009
Incendio de charco	0,051	0,2	0,071
Sin consecuencias	0,929	0,8	0,912

Con referencia a este último escenario, es preciso señalar que, al igual que se ha indicado para líquidos volátiles, el término «sin consecuencias» significa que no ocurrió la combustión de los vapores inflamables generados, ya sea porque no había ninguna fuente de ignición en el momento del escape o porque la nube de vapor de la sustancia no alcanzó su límite de inflamabilidad, o simplemente porque no se generó ninguna nube de vapor. Sin embargo, es posible que hayan ocurrido otras consecuencias dependiendo de las propiedades de la sustancia involucrada, como la dispersión de vapores tóxicos o algún otro tipo de contaminación ambiental.

Respecto a las causas de las pérdidas de contención para esta categoría de sustancias, se han observado resultados similares a los encontrados para líquidos volátiles (Tabla 3-9). Puesto que el número de roturas totales es bajo, solamente se pueden extraer conclusiones genéricas: la mayoría de los escapes fueron causados por fallos mecánicos, principalmente asociados a la sobrepresión interna, a los fallos de la soldadura y a los defectos de construcción.

Tabla 3-9. Distribución de las causas generales y específicas de fallo de las tuberías, según la modalidad de pérdida de contención de líquidos con baja volatilidad.

Causa general y específica	Modalidad de pérdida de contención			
	Orificio		Rotura total	
	No. de entradas	%	No. de entradas	%
<i>Actividades de terceros</i>	33	33,3	0	0,0
Maquinaria de excavación	29	87,9	-	-
Vehículo/otro equipo no relacionado con excavación	3	9,1	-	-
Causa específica desconocida	1	3,0	-	-
<i>Corrosión</i>	17	17,2	2	13,3
Externa	6	35,3	1	50,0
Interna	3	17,6	-	-
Corrosión bajo tensión	2	11,8	-	-
Causa específica desconocida	6	35,3	1	50,0
<i>Fallos mecánicos</i>	24	24,2	5	33,3
Fallo de soldadura	10	41,7	1	20,0
Defecto del material	7	29,2	-	-
Sobrepresión	1	4,2	3	60,0
Defecto de construcción	1	4,2	1	20,0
Defecto de construcción y fallo de soldadura	1	4,2	-	-
Envejecimiento	2	8,3	-	-
Causa específica desconocida	2	8,3	-	-
<i>Errores humanos/operativos</i>	5	5,1	2	13,3
Mantenimiento	2	40,0	1	50,0
Puesta en marcha	1	20,0	-	-
Operaciones generales	1	20,0	-	-
Operación de válvula	-	-	1	50,0
Prueba de presión	1	20,0	-	-
<i>Peligros naturales</i>	0	0,0	1	6,7
Bajas temperaturas	-	-	1	100,0
<i>Fallos del equipo</i>	8	8,1	1	6,7
Brida	5	62,5	1	100,0
Bomba/compresor	1	12,5	-	-
Causa específica desconocida	2	25,0	-	-
<i>Causa general desconocida</i>	12	12,1	4	26,7
Total	99	100,0	15	100,0

En el caso de los escapes a través de orificios (99 casos), se pueden deducir cifras más significativas: las actividades de terceros son el principal grupo de causas generales (33,3%), con daños por maquinaria de excavación como la causa específica más frecuente (87,9% de la causa general); los fallos mecánicos son la segunda causa general en términos de frecuencia (más del 24% de los accidentes), siendo los fallos de la soldadura y los defectos materiales las

contribuciones específicas más comunes (41,7% y 29,9%, respectivamente). La corrosión también tiene una contribución importante en este tipo de escapes (17,2%), principalmente generada por agentes externos.

3.4. Conclusiones

Se ha confirmado cuantitativamente la hipótesis intuitiva de la importancia de la volatilidad de la sustancia: la probabilidad general de que una pérdida de contención accidental termine de manera segura aumenta prácticamente conforme la volatilidad de la sustancia disminuye (*i.e.*, 35,4% en gases comprimidos, 30,6% en gases licuados a presión, 85,9% en líquidos volátiles y 91,2% en líquidos con baja volatilidad). Además, para los escapes de gases, el evento final más peligroso asociado al posible efecto dominó está representado por un dardo de fuego por su gran longitud y alto flujo calorífico, que también es el evento más probable (38,5% en gases comprimidos y 40,7% en gases licuados a presión). Los resultados caracterizados por grandes áreas de impacto, tales como la explosión de una nube de gas, son más probables para gases comprimidos y gases licuados a presión (entre el 26% y 30% de probabilidad), pero poco habituales para líquidos volátiles (menos del 5% de probabilidad), excepto para los casos con afectación al medio ambiente, ya que éstos también pueden abarcar grandes superficies. Para los escapes de líquidos, el evento final más peligroso está representado por un incendio de charco, pero con una probabilidad de ocurrencia de alrededor del 5%.

Respecto a la causalidad de las pérdidas de contención, se ha encontrado que las actividades de terceros son la principal causa de los escapes por un orificio en las cuatro categorías de sustancias. En los casos de rotura total, las actividades de terceros también fueron la causa principal de los escapes de gases, mientras que en los escapes de líquidos la principal causa fueron los fallos mecánicos.

Se cree que los resultados numéricos presentados en este capítulo pueden ser de gran ayuda en la aplicación de la metodología de análisis cuantitativo de riesgos en el transporte de materiales peligrosos por tubería, tanto por la importante cantidad de datos históricos analizados, como por su asociación específica con categorías de sustancias, siendo por tanto preferibles a la posibilidad de dar simplemente los datos de los materiales peligrosos de manera global.

FORMACIÓN DE CRÁTERES POR LA ROTURA DE TUBERÍAS ENTERRADAS DE GAS NATURAL: UN ANÁLISIS BASADO EN ACCIDENTES HISTÓRICOS

4.1. Introducción

El elevado crecimiento demográfico y la rápida urbanización e industrialización en todo el mundo han llevado a un aumento substancial en el consumo de GN y, por consiguiente, a un aumento en su transporte a través de tuberías de alta presión que recorren distancias cada vez más largas (EGIG, 2015). De acuerdo con la Administración de Información sobre Energía de EE. UU. (EIA, 2017), el consumo mundial de GN aumentó de 1.499 billones de m³ en 1980 a 3.476 billones de m³ en 2014 debido al rápido crecimiento económico, lo que representa un incremento de 132%. A nivel regional (Fig. 4-1), el consumo de GN en Oriente Medio aumentó más de doce veces, de 37 billones de m³ en 1980 a 456 billones de m³ en 2014; durante el mismo período, el consumo en Asia y Oceanía creció un 859% (de 73 a 700 billones de m³), en África 533% (de 21 a 133 billones de m³), en la región de América Central y del Sur creció 369% (de 35 a 164 billones de m³), mientras que en Europa, Eurasia y América del Norte el aumento ha sido menor: 50% (de 317 a 475 billones de m³), 61% (de 377 a 606 billones de m³) y 47% (de 639 a 942 billones de m³), respectivamente.

Para hacer frente al rápido crecimiento en el consumo de GN, en muchos países la industria del gas generalmente maximiza su capacidad de transporte ya sea aumentando la presión de operación del sistema o instalando más tuberías, con frecuencia de forma paralela a las existentes. Por esta razón, a menudo se pueden encontrar tuberías paralelas o cruzadas, a veces con una corta distancia de

separación entre ellas, transportando gas o petróleo a grandes distancias, lo que implica un cierto riesgo asociado a la posible interacción de estos sistemas (Acton et al., 2010; Wang et al., 2011). En estas situaciones, es posible que una pérdida de contención ocurrida en una tubería afecte a otras tuberías cercanas, o incluso a otras estructuras ubicadas alrededor del sitio del accidente. De hecho, esto ha sucedido en varios accidentes con severas consecuencias sobre las personas o con enormes pérdidas materiales y económicas (Ramírez-Camacho et al., 2015).

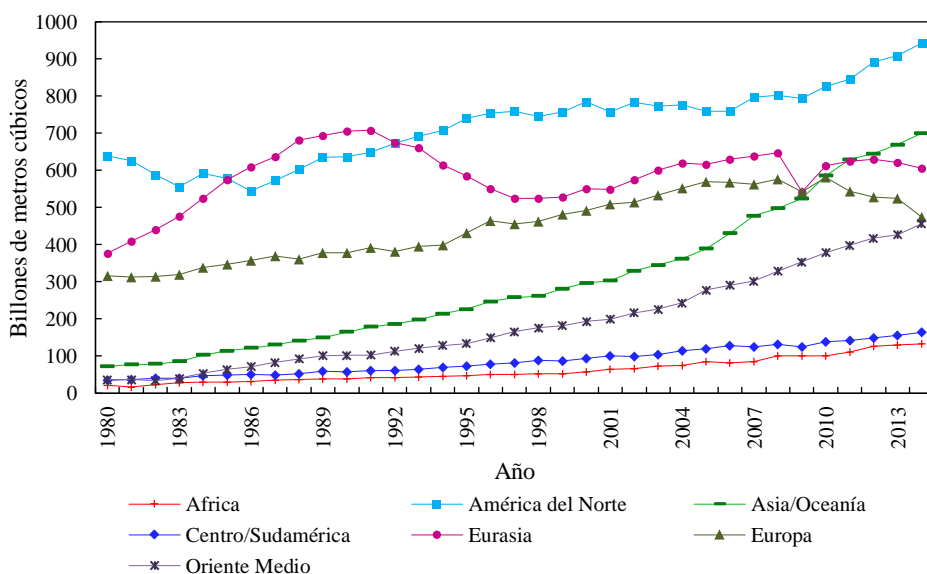


Fig. 4-1. Consumo mundial de gas natural durante el período 1980–2014 (EIA, 2017).

Debido a sus características físicas y químicas, el GN presenta diversos posibles escenarios de riesgo dependiendo de si se incendia o no. Si se incendia inmediatamente después del escape, entonces ocurrirá un dardo de fuego. Si no hay ignición, el gas se dispersará en la atmósfera (dispersión tóxica). Si la ignición es retrasada, es posible que ocurra un incendio de llamarada o una explosión de la nube de gas, seguida de un dardo de fuego. La posible ocurrencia de estos escenarios dependerá también de la modalidad del escape (rotura total, fuga/perforación), del volumen de gas liberado, las condiciones meteorológicas en el momento del accidente y las características del entorno (urbano, rural). Por lo tanto, para garantizar la integridad de las tuberías de GN, es necesario que se evalúen todos los escenarios de riesgo posibles, así como sus consecuencias

(principalmente sobre las personas), entre otras razones porque la seguridad debe tener prioridad absoluta sobre la demanda.

En relación con los posibles escenarios accidentales que pueden ocurrir en tuberías de GN, un evento que no ha sido extensamente estudiado es la formación de un cráter por la rotura de una tubería de alta presión enterrada. Este evento es muy importante debido a su potencial destructivo, especialmente cuando ocurre cerca de otras tuberías o en las proximidades de áreas donde las consecuencias pueden ser significativas (incluyendo zonas pobladas). En el caso de tuberías paralelas, la formación de un cráter podría conducir a un efecto dominó, agravando significativamente la magnitud del accidente y sus consecuencias (Hemmatian et al., 2014).

La revisión de la bibliografía muestra que la mayoría de los trabajos de investigación publicados se han enfocado a estudiar el mecanismo de formación de cráteres y sus dimensiones, pero en explosiones subterráneas de TNT (Holsapple, 1980; Luccioni et al., 2009; Xin-zhe et al., 2013) y nucleares (Hansen, 1968; Nordyke, 1977; Orphal, 1977; Fokin, 2000; Mader, 2009). Solamente unos pocos trabajos se han centrado específicamente en la formación de cráteres por la rotura explosiva de tuberías enterradas. Por ejemplo, Bartenev et al. (1996) analizaron las roturas accidentales en la red de gasoductos Centro-Asiáticos, que va de Turkmenistán vía Uzbekistán y Kazajstán a Rusia, y encontraron una relación directa entre la longitud de la rotura de la tubería y la longitud del cráter formado. Acton et al. (2010) desarrollaron un marco, basado en datos experimentales, para determinar distancias de separación de diseño adecuadas entre gasoductos paralelos enterrados, incluyendo las dimensiones máximas del cráter formado por la rotura de una tubería. Por último, Silva et al. (2016) analizaron las roturas de tuberías enterradas de productos del petróleo con formación de un cráter y propusieron un modelo para predecir la anchura del cráter en función de los parámetros de la tubería y la densidad del suelo.

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores, en este capítulo se ha realizado un estudio histórico de accidentes ocurridos en tuberías enterradas de GN que han involucrado la formación de un cráter. El objetivo ha sido construir una base de datos específica para analizar estadísticamente sus principales características y mejorar así la información y el conocimiento sobre de este tipo de eventos. Los accidentes ocurridos en tuberías de líquidos no se han

considerado aquí, ya que estas tuberías operan a bajas presiones debido a la naturaleza incompresible del fluido y, en consecuencia, los cráteres resultantes de las roturas de estas tuberías son generalmente mucho más pequeños que los de tuberías de gas de alta presión (Acton et al., 2010). El análisis de los datos ha permitido establecer la influencia de los parámetros de la tubería que determinan el potencial energético de una rotura explosiva (diámetro, presión de operación, longitud de la rotura y profundidad de instalación) sobre las dimensiones del cráter resultante, así como calcular la probabilidad de efecto dominó en tuberías paralelas. Asimismo, se han evaluado las posibles secuencias dominó por la formación de un cráter y se han calculado las probabilidades condicionales en estos casos. El estudio de estos escenarios accidentales, basado en casos reales, representa un punto de partida útil y necesario en el análisis de riesgos en el transporte de GN por tuberías.

4.1.1. Descripción de un sistema de tuberías de GN

La secuencia típica de operaciones necesarias para suministrar GN limpio desde las regiones productoras al consumidor final es la siguiente:

1. *Extracción*: el GN crudo se extrae de los depósitos subterráneos naturales, el cual se canaliza a través de tuberías de pequeño diámetro a una planta de procesamiento central, ubicada normalmente a poca distancia. Previamente al procesamiento del gas se eliminan el vapor de agua, arena y otras impurezas para evitar la contaminación y la corrosión de los equipos y tuberías. Una vez eliminadas las impurezas, quedan Metano (gas), Líquidos del Gas Natural (LGN) y Gas Licuado del Petróleo (GLP) (estos dos últimos en estado líquido).
2. *Procesamiento*: aquí el GN libre de impurezas se separa de los llamados LGN, como el propano y el butano, para comercializarse por separado.
3. *Compresión y transporte*: una vez limpio, el GN seco es comprimido y transportado a través de líneas de transmisión a largas distancias hasta los sistemas de distribución.
4. *Distribución*: una vez que el GN llega a su destino, es entregado por empresas locales de distribución directamente a los hogares y negocios, a través de una red de tuberías de pequeño diámetro.

a) Tipos de tuberías

El transporte eficiente y eficaz del GN se realiza a través de una extensa y compleja red de tuberías, las cuales se clasifican de acuerdo con su función en tres tipos (PHMSA, 2016d): líneas de recolección, líneas de transmisión y líneas de distribución. Esta clasificación ya se ha tratado en el Capítulo 1.

b) Profundidad de instalación

Las tuberías de GN se instalan generalmente a poca profundidad bajo el suelo, para facilitar la instalación y el acceso durante las actividades de mantenimiento o reparación. Este enfoque es especialmente ventajoso puesto que el suelo proporciona un modo práctico para soportar tuberías de alta presión bajo condiciones de operación, así como para protegerlas de la exposición a los elementos naturales (*e.g.*, condiciones meteorológicas adversas, radiación ultravioleta) y de los riesgos inducidos por el ser humano (Wijewickreme y Weerasekara, 2011). Sin embargo, incluso en tuberías enterradas, una pérdida de contención inadvertida podría afectar la salud y la seguridad humanas o causar daños a la propiedad y costes elevados.

La Tabla 4-1 muestra los requerimientos de profundidad normal para tuberías enterradas de GN, de acuerdo con el uso y tipo de suelo. La profundidad de la tubería debe ser apropiada para la ubicación de la ruta, el uso superficial de la tierra, las características del terreno y las cargas impuestas por estructuras de transporte terrestre como carreteras y vías ferroviarias. En lugares como cuerpos de agua y montañas, o en áreas sujetas a erosión o donde la actividad agrícola u otras operaciones podrían resultar en un arado profundo, las tuberías pueden colocarse a una profundidad de entre 1,2 y 1,5 metros (ASME, 2004).

Tabla 4-1. Cubierta mínima para tuberías enterradas de gas natural (ASME, 2004; GPO, 2010).

Ubicación de la ruta	Para excavación normal (m)	En áreas de roca consolidada (m)
<i>Líneas de recolección y transmisión</i>		
Áreas industriales, comerciales y residenciales	0,914	0,762
Cruce de ríos y arroyos	1,219	0,457
Zanjas de drenaje en carreteras y vías ferroviarias	0,914	0,610
Cualquier otra área	0,762	0,457
<i>Líneas de distribución</i>		
Áreas industriales, comerciales y residenciales	0,610	0,610
Carreteras y calles	0,457	0,457
Propiedad privada	0,305	0,305

Las tuberías para el transporte de GN se han utilizado desde principios del siglo XX. Sin embargo, no fue hasta 1970 que se establecieron lineamientos para la construcción de tuberías de transmisión y de distribución de GN y de otros gases (PHMSA, 1970). Por lo tanto, las tuberías que se instalaron antes de esa fecha no tenían que cumplir con estos requisitos, y también estaban exentas de las regulaciones posteriores sobre el nivel de tensión. Algunas de estas tuberías siguen en funcionamiento hoy en día, por lo que podrían estar enterradas a cualquier profundidad (PHMSA, 2011a; EGIG, 2015). Esta situación aumenta la probabilidad y la posibilidad de que ocurran accidentes graves.

c) Características del suelo

Las tuberías de transporte de GN atraviesan varias zonas geográficas como bosques, humedales, desiertos, ríos y zonas urbanas, entre otras, con diferentes características del suelo (*e.g.*, consistencia, permeabilidad y porosidad). Por lo tanto, una comprensión detallada de las condiciones del subsuelo a lo largo de la ruta de la tubería es de vital importancia para su diseño y construcción, con el fin de asegurar buenas predicciones del rendimiento de la tubería a largo plazo.

Entre los diferentes tipos de suelo en lo que generalmente se colocan las tuberías se encuentran los suelos cohesivos (arcilla) y no cohesivos (suelo granulado como grava, arena o limo con poco o ningún contenido de arcilla) y roca consolidada (Occupational Safety and Health Administration [OSHA], 2003, 2015). Desafortunadamente, las fuentes consultadas no contienen información sobre las características del suelo donde ocurrieron los accidentes, por lo que este parámetro no se ha analizado en el presente trabajo.

4.1.2. Formación de un cráter por la rotura de una tubería enterrada

Un cráter se produce milisegundos después de un evento explosivo que causa la fractura, compactación y deformación plástica del suelo inmediato. El resultado es la formación de una cavidad en forma de cuenco por la expulsión de material que se encuentra debajo de la superficie del suelo. Las dimensiones del cráter formado definirán el tamaño del área que resultaría afectada.

En el caso de la rotura de una tubería enterrada de GN, los parámetros que pueden condicionar el tamaño y forma del cráter formado son los relacionados con la propia tubería, tales como el diámetro, la presión interna y la longitud de

la fractura (asociada con la rotura de la tubería), y con las condiciones externas, como la profundidad a la que está enterrada la tubería y las características del suelo (Tonelli y Aparicio, 2005).

La configuración clásica de un cráter se presenta en la Fig. 4-2. Las dimensiones del cráter utilizadas aquí se basan en las definidas por Hansen et al. (1964) y Cooper (1996). D_{ac} representa el diámetro aparente del cráter, D_{tc} representa el diámetro verdadero del cráter, H_{ac} es la profundidad aparente del cráter y H_{tc} es la profundidad verdadera del cráter. Respecto a los parámetros de la tubería, D representa el diámetro, P_d la profundidad de instalación y L_r es longitud de la rotura de la tubería. El término «cráter verdadero» se refiere al cráter formado inmediatamente después de la rotura de la tubería. Tras la rotura, parte del suelo expulsado cae de nuevo en el cráter recién creado para formar el «cráter aparente» (configuración final del cráter), mientras que otra porción del suelo, incluso secciones de la tubería, son expulsados a cierta distancia del sitio del accidente. El cráter verdadero es más profundo que el cráter aparente; sin embargo, en la práctica resulta difícil realizar una medición física directa del cráter verdadero, por lo que las medidas tomadas tras la rotura son las del cráter aparente.

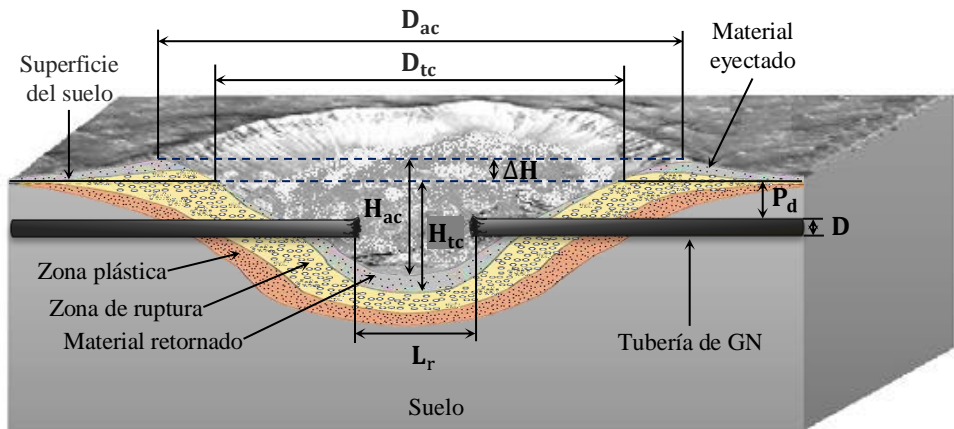


Fig. 4-2. Vista transversal de un cráter formado por la rotura explosiva de una tubería enterrada de gas (adaptado de Hansen et al., 1964 y Cooper, 1996).

a) Causas y energía involucrada

En tuberías enterradas de GN, la formación de un cráter puede ser causada por la rotura abrupta y catastrófica de la tubería de alta presión (causada a su vez por un fallo de la tubería, por ejemplo, un fallo mecánico) o por la ignición explosiva de gas acumulado que se escapa por un orificio en la pared de la tubería (una fisura en la soldadura, un orificio por corrosión o una perforación accidental). Sin embargo, la probabilidad de que esto ocurra (*i.e.*, que el gas se escape y fluya a través del suelo, entre en la atmosfera y accidentalmente se incendie, explote y rompa la tubería) es muy baja (Institution of Gas Engineers and Managers [IGEM], 2012). No obstante, si el tamaño del orificio excede una cierta longitud «crítica» (en dirección longitudinal de la tubería), entonces la tubería podría romperse y crear un cráter (Spoelstra y Laheij, 2011).

Cualquiera que sea la causa de la rotura de la tubería, la energía involucrada en la formación del cráter es diferente en cada caso. De acuerdo con Peekema (2013), la rotura de una tubería causada por la ignición explosiva de una acumulación de gas que se escapa por un orificio involucraría tanto la energía de compresión como la energía química del gas. Esta última estará disponible una vez que el gas se haya mezclado con aire y la mezcla esté dentro de los límites de explosividad, junto con una fuente de ignición; la energía química disponible en una mezcla explosiva gas/aire es mucho mayor que la energía de compresión en el gas. Sin embargo, se debe considerar la posibilidad de que la energía de compresión del gas haya disminuido o, en última instancia, se haya perdido cuando el gas se escapó de la tubería. Por otra parte, el mismo autor indica que en la rotura abrupta de una tubería causada por un fallo mecánico, la energía involucrada es solamente la energía de compresión contenida en el gas presurizado, la cual se libera en el momento de la rotura. En este caso, el gas que se escapa de la tubería rota podría incendiarse, pero no «explotar», por lo que la energía química del gas contribuiría al fuego posterior y no a la rotura explosiva.

En cualquier caso, el gas que se escapa de la tubería rota puede tener un «efecto de lavado» y arrastrar la tierra suelta o el material de roca que encuentra a su paso; incluso podría expulsar grandes fragmentos de tubería. De esta manera, el cráter final podría ser mucho más grande que el formado por cualquiera de las causas anteriores. Por lo tanto, las dimensiones del cráter final pueden también depender de la energía cinética del fluido que se escapa y de la duración de la acción erosiva (Peekema, 2013).

4.1.3. Posibilidades de efecto dominó por la formación de un cráter

Una vez que el cráter se ha formado por la rotura inicial de la tubería (T1), las posibilidades de un efecto dominó dependen de si una segunda tubería (T2) queda dentro de los límites del cráter o no. Otro aspecto importante es si el gas se incendia o no.

Si la T2 queda fuera de los límites del cráter, entonces no sufrirá ningún daño (ya sea por el efecto explosivo o por la radiación térmica), ya que estará protegida por el suelo que la rodea. Por el contrario, si la T2 queda dentro del cráter formado (ya sea total o parcialmente expuesta), existen básicamente dos posibilidades para que falle. La primera se refiere a la posibilidad de que el efecto explosivo de la rotura inicial de la T1 dañe a la T2 (ya sea una rotura total o una perforación), provocando su fallo y, en consecuencia, el escape del fluido contenido. En este caso, si el fluido de la T2 se incendia, el peligro resultante provendría de la radiación térmica o el contacto directo con las llamas producidos por el incendio de los fluidos que se escapan de ambas tuberías rotas. Si no hay ignición, el gas que se escapa se dispersará en la atmósfera. Alternativamente, si el efecto explosivo de la rotura inicial no afectó a la T2 pero el gas que se escapa de la T1 rota se incendia, existe una probabilidad de que las llamas incidan directamente sobre la T2. Si esto ocurre y la T2 transporta un gas o un flujo bifásico y, además, si no está adecuadamente protegida contra el fuego, entonces podría fallar. Sin embargo, si transporta un fluido a alta presión y gran velocidad, el coeficiente de transferencia de calor al fluido interno puede ser suficiente para prevenir su fallo. Si transporta un líquido, éste actuará como refrigerante y enfriará la pared de la tubería evitando su fallo; sin embargo, si el flujo en la T2 está interrumpido por las válvulas de bloqueo, esto podría conducir al fallo de la tubería. Si no hay choque directo de las llamas, la T2 probablemente no se verá afectada, pero podría fallar si transporta un gas y si recibe una fuente radiación térmica.

Estas posibilidades de efecto dominó refuerzan la necesidad de estudiar las características de las roturas históricas de tuberías de GN que han involucrado la formación de un cráter, sobre todo considerando la gran cantidad de tuberías de GN instaladas en todo el mundo, con la consiguiente interacción con el suelo y otras tuberías. El análisis de esta información puede brindar una base útil para el

desarrollo de herramientas que permitan mejorar la seguridad de las tuberías y de sus alrededores.

4.2. Métodos

4.2.1. Recopilación y organización de los datos

La información de las roturas de tuberías enterradas de GN que involucraron la formación de un cráter fue recolectada de fuentes especializadas en accidentes de tuberías, tales como bases de datos, informes técnicos y reportes de accidentes. Las principales fuentes documentales fueron las mismas que se utilizaron para el análisis histórico presentado en el Capítulo 2.

Tabla 4-2. Estructura de la base de datos de accidentes en tuberías de gas natural que han involucrado la formación de un cráter.

Bloque	Campo de datos
1. Identificación del accidente	No. de registro Fecha de ocurrencia Ubicación
2. Características de la tubería	Diámetro Espesor de la pared Grado de fabricación Año de instalación Presión Tipo de tubería Profundidad de instalación
3. Dimensiones del cráter	Longitud Anchura Profundidad Área Volumen
4. Características del accidente	Longitud de la rotura Distancia a los fragmentos de la tubería Ignición Longitud de las llamas Tiempo hasta la ignición Tiempo hasta el apagado del sistema
5. Naturaleza del accidente	Causas
6. Consecuencias	Muertos Heridos Evacuados
7. Referencias	Fuentes de información Informe disponible

Cuando se identificaba un registro de interés, la información disponible se almacenaba en una base de datos diseñada en formato MS Excel. La Tabla 4-2 muestra los campos utilizados para organizar los datos, divididos en siete bloques. Básicamente, la información contenida en la base de datos se refiere a la identificación de los accidentes (fecha, lugar de ocurrencia, características, etc.), las características de las tuberías, las dimensiones de los cráteres y las consecuencias (muertos, heridos y evacuados). Cabe señalar que el análisis de consecuencias de estos accidentes no ha sido objeto de este estudio.

En varios de los registros extraídos de las fuentes consultadas, la información relevante para el análisis era incompleta o inexacta. Para complementar los datos faltantes y para encontrar nuevos accidentes, se realizó una búsqueda detallada consultando otras fuentes de libre acceso que cubren accidentes en tuberías (*e.g.*, periódicos, artículos, sitios web). Después de aplicar este proceso de extracción, se obtuvo finalmente una colección de 90 accidentes relacionados con la formación de cráteres por la rotura de tuberías enterradas de GN (véase el Apéndice E). Los registros recopilados abarcan el período 1954-2015. Se encontraron más casos de cráteres producidos por la rotura de tuberías de GN; sin embargo, no se han incluido en este análisis ya que los registros carecían de información importante sobre las dimensiones del cráter.

Por otro lado, muchos de los casos recopilados no contenían información sobre el área y el volumen del cráter (aparente). Por lo tanto, en los casos en que fue posible, estos dos valores han sido calculados representando la forma del cráter como un semielipsoide con centro en el origen de coordenadas y ejes coincidentes con los ejes cartesianos (Fig. 4-3).

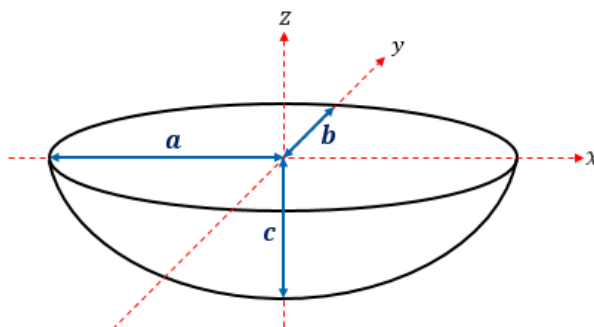


Fig. 4-3. Representación geométrica de un cráter.

De la Fig. 4-3, el área del cráter se calcula como sigue:

$$A_c = \pi \cdot a \cdot b \quad (4.1)$$

donde a es la mitad de la longitud del cráter en el eje x , y b es la mitad de la anchura del cráter en el eje y .

El volumen contenido dentro del semielipsoide está dado por la siguiente ecuación:

$$V_c = \frac{2}{3} \pi \cdot a \cdot b \cdot c \quad (4.2)$$

donde c es la profundidad del cráter con respecto al eje z .

4.3. Resultados y discusión

4.3.1. Análisis exploratorio

a) Distribución por diámetro y tipo de tubería

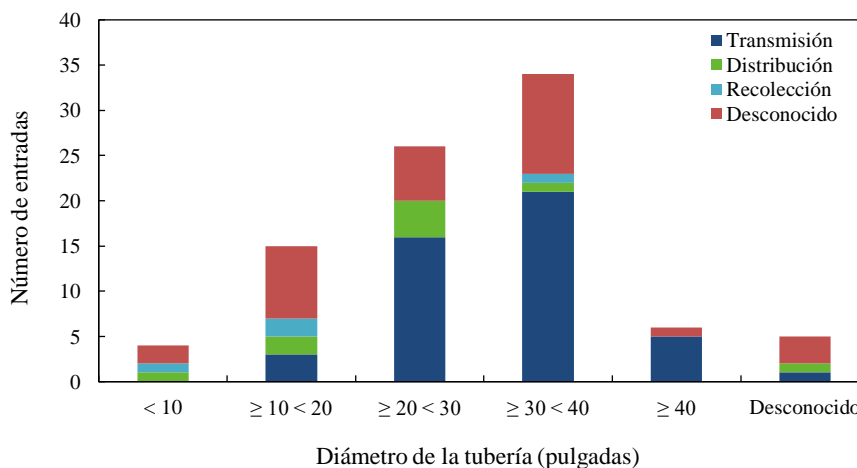


Fig. 4-4. Distribución de los accidentes de cráteres según el diámetro y tipo de tubería.

La Fig. 4-4 muestra la distribución de los accidentes, en categorías arbitrarias (< 10 pulgadas, ≥ 10 < 20 pulgadas, etc.), según el diámetro de las tuberías involucradas en los accidentes. Esta información se conoce en el 94,5% de los casos (85 eventos). De estos, los diámetros de tubería de entre 20 y 40 pulgadas

fueron los más frecuentemente involucrados (70,6%, 60 eventos), seguidos en menor proporción por tuberías de menos de 20 pulgadas de diámetro (22,3%, 19 eventos) y de más de 40 pulgadas (7,1%, 6 eventos).

La Fig. 4-4 también muestra la distribución de los accidentes de acuerdo con el tipo de tubería. Esta información está disponible en el 65,6% de los casos (59 entradas). La mayoría de estos eventos (78%, 46 casos) ocurrieron en tuberías de transmisión y, en menor medida, en tuberías de distribución (15,2%, 9 casos) y de recolección (6,8%, 4 casos). Esta distribución se puede explicar y justificar por la gran longitud de tuberías de transmisión instaladas en todo el mundo, en comparación con otros tipos de tuberías.

b) Distribución según la profundidad de instalación

Respecto a la profundidad de entierro de las tuberías, la Fig. 4-5 muestra esta distribución según el diámetro y tipo de tubería. Esta información se conoce en el 55,6% de los casos (50 entradas). De estos, el 52% de las tuberías están enterradas a una profundidad de entre 1 y 2 metros, mientras que el 26% lo están a una profundidad inferior a un metro y el 20% a una profundidad de entre 2 y 5 metros. Solamente el 2% (un caso) tiene una profundidad superior a 5 metros. Este último caso corresponde al accidente ocurrido el 13 de febrero de 2014 en Kentucky (EE.UU.), donde una tubería de GN de 30 pulgadas enterrada a una profundidad de 9,1 metros se rompió, dejando un cráter de 18 metros de profundidad y 15 metros de ancho (PHMSA, 2014c).

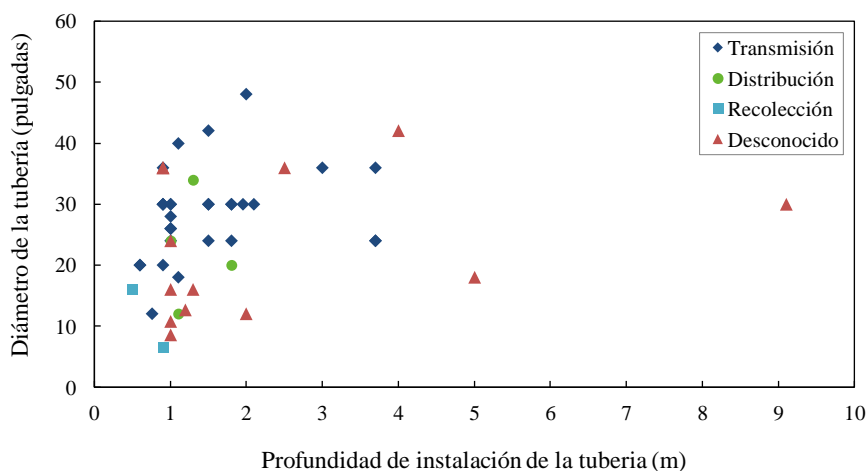


Fig. 4-5. Distribución de los accidentes según la profundidad de instalación de la tubería.

c) Distribución según la presión de operación

La Fig. 4-6 muestra el predominio de las altas presiones de operación de las tuberías. El 73,3% (66 entradas) de los casos reportan este dato. Puede apreciarse con claridad que la tendencia es operar a presiones entre 40 y 70 bares (79% de los casos conocidos). Puede observarse también que la presión de operación aumenta a medida que aumenta el diámetro de la tubería. Si bien las tuberías de recolección, transmisión y distribución están diseñadas y fabricadas para soportar mucha más presión de la que realmente podría alcanzar el sistema, es un hecho que cuanto mayor sea la presión al interior de la tubería, más potencialmente peligrosa será una pérdida de contención.

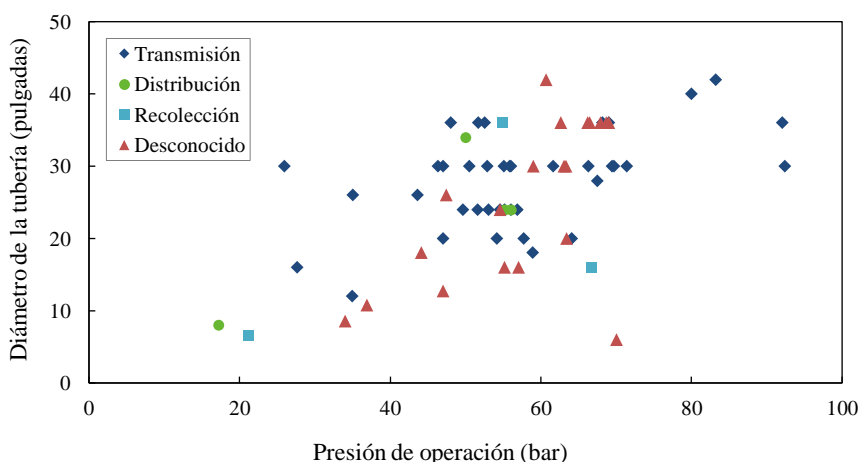


Fig. 4-6. Distribución de los accidentes según la presión de operación de las tuberías.

d) Distribución según la longitud de la rotura

La longitud de la rotura es un parámetro que requiere especial atención, pues, debido a la simetría axial de la tubería, define los límites del cráter – principalmente a lo largo– y, por lo tanto, la posible área de destrucción total.

La rotura de una tubería ocurre en un proceso de tres etapas (iniciación de la grieta, propagación de la misma y, finalmente, la rotura total) y está definida por las características de la tubería (material de construcción, edad, etc.) y la presión de operación. Andrews et al. (2004) señalan que la combinación de la presión de operación y el ángulo de apertura de la grieta (este factor no se estudia aquí)

puede dar como resultado que el agrietamiento se propague durante 20 metros, o más, a una velocidad de 200-300 m/s.

La Fig. 4-7 muestra la distribución de los accidentes según la longitud de la rotura. Esta información se conoce en el 50% de los casos. La mayoría de las roturas oscilaron entre 1 y 30 metros de longitud (82,2%, 37 casos), seguidas, con mucha menor frecuencia, por longitudes de más de 30 y menos de 60 metros (11,1%, 5 casos), lo que concuerda con lo indicado por Andrews et al. (2004). Solamente el 2,2% (un caso) tuvo una rotura mayor de 100 metros de longitud; este caso corresponde al accidente ocurrido el 21 de febrero de 1986 en Kentucky (EE.UU.), en el que un gasoducto de 30 pulgadas se rompió (rotura longitudinal de 146 metros), originando un cráter de 152 metros de largo y 9,1 metros de ancho (HSE, 2000).

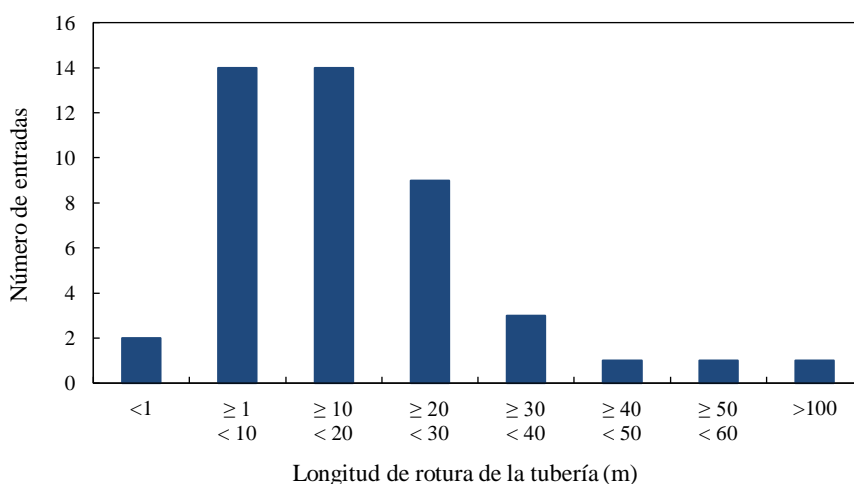


Fig. 4-7. Distribución de los accidentes según la longitud de rotura de las tuberías.

e) Distribución según las causas

Del número total de accidentes de cráteres identificados, la información sobre las causas se conoce en el 66,7% de los casos (60 entradas). La contribución de las diversas causas generales se ha resumido en la Tabla 4-3. Tres de ellas muestran una contribución importante: la corrosión (41,7%), los fallos mecánicos (33,3%) y las actividades de terceros (21,7%); los errores humanos/operacionales tienen una contribución más baja.

Tabla 4-3. Distribución de los accidentes con formación de cráter según su causa.

Causa	Número de entradas	%
<i>Corrosión</i>	25	41,7
Corrosión bajo tensión	13	52,0
Externa	9	36,0
Interna	3	12,0
<i>Fallos mecánicos</i>	20	33,3
Defecto del material	10	50,0
Fallo de soldadura	6	30,0
Defecto de construcción	3	15,0
Sobrepresión	1	5,0
<i>Actividades de terceros</i>	13	21,7
Maquinaria de excavación	13	100,0
<i>Errores humanos/operativos</i>	2	3,3
Mantenimiento	2	100,0

La contribución según la causa específica también se puede observar en la Tabla 4-3. Respecto a los accidentes causados por corrosión, la mayoría de estos eventos (52,0%) fueron causados por corrosión por tensión, seguidos por corrosión externa y, por último, corrosión interna. Estos datos indican que el mantenimiento es un tema muy importante para mantener la integridad de la tubería. Entre los accidentes causados por fallos mecánicos, la causa específica más frecuente fueron los defectos materiales (50,0%), seguidos por fallos de soldadura, defectos de construcción y sobrepresión. En cuanto a los accidentes originados por actividades de terceros, todos fueron causados por maquinaria de excavación como única causa específica. Finalmente, para los eventos causados por errores humanos/operativos, la principal fuente de errores fueron las actividades de mantenimiento; aunque este grupo es mucho más pequeño que las otras causas, es importante destacarlo pues su contribución puede reducirse considerablemente o prácticamente eliminarse intensificando la formación de los operadores.

4.3.2. Análisis de la influencia de los parámetros de la tubería sobre las dimensiones del cráter

A partir de los datos obtenidos, se ha realizado un estudio de correlaciones para evaluar el grado de relación lineal entre las dimensiones del cráter (variables dependientes) y los parámetros de la tubería (variables independientes). Los resultados del cálculo de las correlaciones muestran que, para un nivel de

significancia del 5%, existen relaciones directas o positivas entre las variables (Tabla 4-4). Puesto que las dimensiones del cráter pueden verse afectadas simultáneamente por más de un parámetro de la tubería, no se espera que los valores de los coeficientes de correlación lineal sean muy altos. Por lo tanto, aunque los coeficientes de correlación calculados son relativamente bajos en algunos casos, es posible determinar con qué parámetros de la tubería está más relacionada una determinada dimensión del cráter.

Tabla 4-4. Matriz de correlación de Pearson entre las dimensiones del cráter y los parámetros de la tubería.

	Dimensiones del cráter					Parámetros de la tubería			
	Longitud	Profundidad	Anchura	Área	Volumen	D	P_{op}	P_d	L_r
Longitud	1,000								
Profundidad	0,050	1,000							
Anchura	0,135	0,191	1,000						
Área	0,770	0,054	0,799	1,000					
Volumen	0,666	0,526	0,713	0,917	1,000				
D	0,057	0,066	0,387	0,141	0,153	1,000			
P_{op}	0,117	0,014	0,114	0,149	0,079	0,298	1,000		
P_d	0,022	0,782	0,088	0,031	0,168	0,037	0,000	1,000	
L_r	0,878	0,024	0,001	0,307	0,024	0,041	0,101	0,000	1,000

D = Diámetro, P_{op} = Presión operativa, P_d = Profundidad de instalación, L_r = Longitud de la rotura.

a) Longitud del cráter

Con respecto a la longitud del cráter (C_l), los resultados muestran que, con un valor de R^2 próximo a 0,9 (Tabla 4-4), existe una alta correlación entre esta dimensión del cráter y la longitud de la rotura de la tubería. Esto reafirma la idea de que es este parámetro de la tubería el que define los límites del cráter en dirección longitudinal. De acuerdo con este resultado, la relación entre estas dos variables se puede establecer de manera más precisa como sigue:

$$C_l = k_1 \cdot L_r \quad (4.3)$$

donde k_1 es un factor de correlación. Se ha hecho una deducción de k_1 , basada en los datos disponibles de ambas variables. La relación entre estos valores dio una estimación media de $k_1 = 1,15$ [error estándar = 0,07]. Este valor es cercano al valor medio (1,02) reportado en la literatura (Bartenev et al., 1996).

b) Profundidad del cráter

Con relación a la profundidad del cráter (C_d), de la Tabla 4-4 se puede deducir que el parámetro de la tubería con el cual tiene una alta correlación ($R^2 = 0,782$) es la profundidad de instalación. Esto puede explicarse por el hecho de que a medida que aumenta la profundidad de la tubería, también lo hace el efecto de confinamiento y, por consiguiente, también incrementa la cantidad de material de suelo que puede ser expulsada por la energía del gas liberado por la rotura de la tubería; en otras palabras, a medida que se incrementa la profundidad de entierro, la profundidad del cráter aumenta hasta alcanzar un máximo (Cooper, 1996). De acuerdo a los datos analizados, la profundidad subyacente a la que pueden darse los tamaños máximos más probables del cráter es de entre 0,9 y 9 metros.

La relación entre estas dos variables puede expresarse mediante la Ec. (4.4). Aquí, el valor medio calculado para el coeficiente de correlación es $k_2 = 1,89$ [error estándar = 0,118].

$$C_d = k_2 \cdot P_d \quad (4.4)$$

c) *Anchura del cráter*

Respecto a la anchura del cráter (C_w), el parámetro con el cual presenta «mayor» correlación es el diámetro de la tubería (Tabla 4-4). Esta apreciación coincide con el resultado encontrado por Silva et al. (2016), quienes señalan que la anchura del cráter aumenta a medida que lo hace el diámetro de la tubería. Sin embargo, dado que el coeficiente de correlación es relativamente bajo ($R^2 = 0,387$; error estándar = 0,014), no se pueden extraer conclusiones precisas sobre la influencia de este parámetro de la tubería en la anchura del cráter.

Se realizó un análisis alternativo de los datos utilizando gráficos de probabilidad normal de efectos y diagramas de Pareto. Los resultados obtenidos han permitido verificar las correlaciones anteriores (véase el Apéndice F).

4.3.3. Probabilidades condicionales de efecto dominó

De los 90 accidentes que involucraron la formación de un cráter, en 31 de éstos había por lo menos una segunda tubería paralela a la tubería fallida. A partir de estos eventos se calculó la probabilidad de efecto dominó tras la formación de un cráter. Los resultados se muestran en el árbol de eventos de la Fig. 4-8.

Formación de cráteres por la rotura de tuberías enterradas de gas natural

Suceso iniciador	Segunda tubería dentro del cráter	Segunda tubería dañada por la explosión de la primera rotura	Ignición del gas	Las llamas inciden sobre la segunda tubería	Segunda tubería transporta gas o flujo bifásico	Segunda tubería bloqueada	Radiación térmica fuerte	Escenario accidental	Probabilidad
------------------	-----------------------------------	--	------------------	---	---	---------------------------	--------------------------	----------------------	--------------

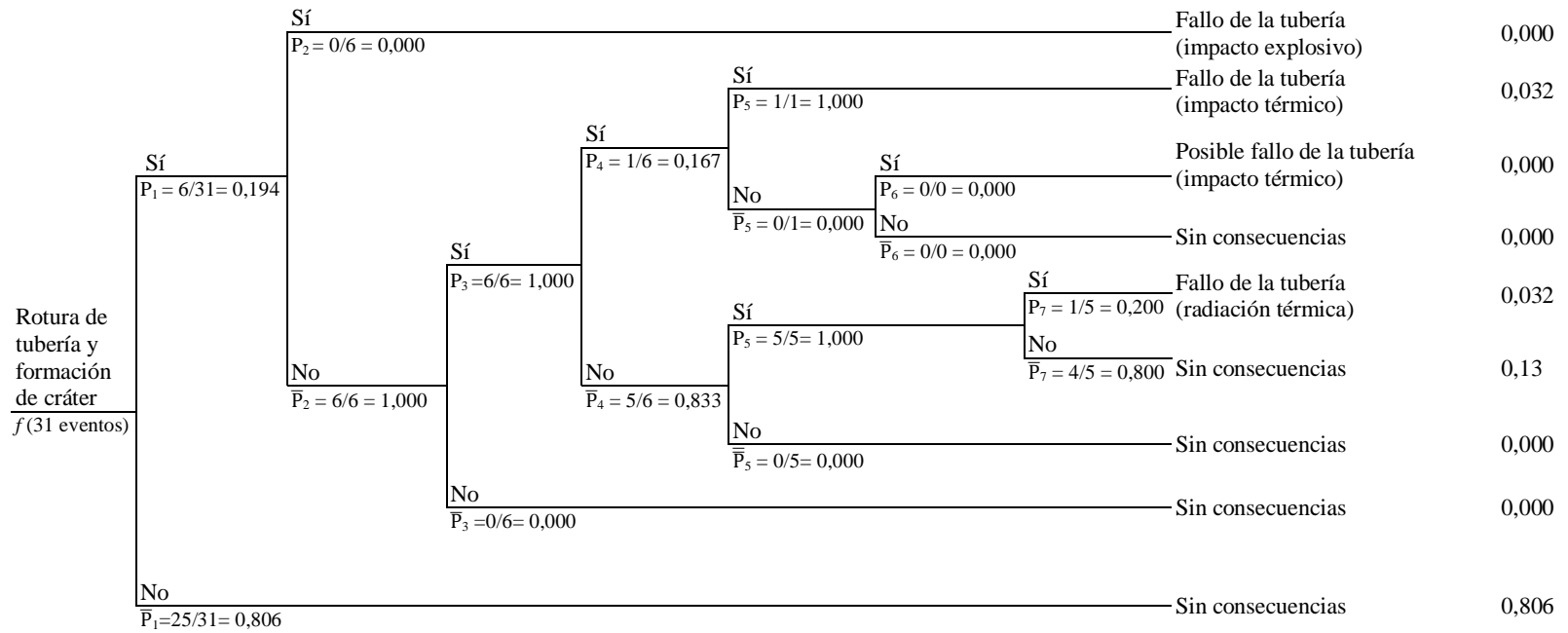


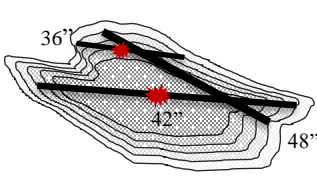
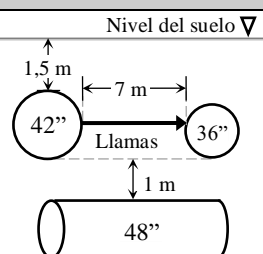
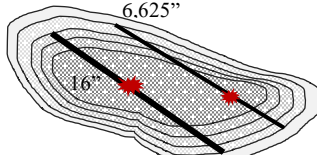
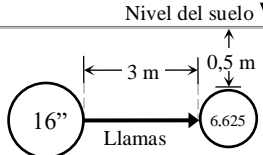
Fig. 4-8. Árbol de eventos de las secuencias dominó tras la formación de un cráter por la rotura de una tubería enterrada de gas natural.

Capítulo 4

De acuerdo con la Fig. 4-8, existe una alta probabilidad (0,806) de que una segunda tubería paralela no quede dentro de los límites del cráter después de la rotura inicial (*i.e.*, de que no resulte afectada ni por el efecto explosivo ni por la radiación térmica del fuego posterior en caso de que el gas que sale de la tubería rota se incendie). Sin embargo, existe una probabilidad de prácticamente el 20% de que una segunda tubería paralela quede dentro de los límites del cráter. En estos casos, la probabilidad de que la tubería expuesta resulte afectada por la rotura explosiva de la primera tubería es nula. Por otro lado, se observa que la probabilidad de ignición del gas que se escapa de la tubería rota es del 100%. Aquí, la probabilidad de que las llamas incidan sobre la tubería paralela expuesta es del 16,7% y, en este caso, del 100% de que falle si transporta un gas. Si las llamas no inciden directamente sobre la tubería expuesta, la probabilidad de que falle es del 20% si recibe una fuerte radiación térmica.

La Tabla 4-5 resume la información de los dos accidentes de cráteres identificados que involucraron un efecto dominó en tuberías paralelas.

Tabla 4-5. Accidentes dominó en tuberías paralelas de gas natural tras la formación de un cráter.

Fecha y lugar	Tubería 1 Diámetro / Profundidad/Presión /Longitud de rotura	Tubería 2 Diámetro / Profundidad/Presión /Longitud de rotura	Configuración del cráter	Configuración del sistema
29/07/1995 Rapid City, Canadá (TSB, 1997; HSE, 2000)	42" / 1,5m / 60,7 bar / 10,5 m	36" / 1,5m / 60,7 bar / 8,5 m		
28/06/2012 Buick, Canadá (TSB, 2013)	16" / - / 66,6 bar / 17 m	6,625" / - / 8,7 bar / 0,45 m		

En el accidente de Rapid City, Canadá (1995), se rompió una de las seis tuberías de GN que conforman el sistema. La rotura ocurrió en la tubería de 42 pulgadas como resultado del agrietamiento por corrosión bajo tensión. La rotura explosiva

creó un cráter (51 metros de longitud, 23 metros de ancho y 5 metros de profundidad) que dejó expuesta la tubería de 36 pulgadas, la cual estaba instalada a la misma profundidad (1,5 m) pero a una distancia de 7 metros (menos que el estándar de espaciado horizontal de la compañía). La sobrecarga del calor, producida por el incendio del gas que se escapaba de la primera tubería, causó la rotura de la tubería de 36 pulgadas. Una tercera tubería de 48 pulgadas, que pasaba bajo la ubicación de la primera y segunda roturas de tubería, quedó expuesta al fuego pero no se rompió. Las tres tuberías restantes no resultaron afectadas, ya que quedaron fuera de los límites del cráter. Como resultado del accidente, una persona resultó herida y 19.600.00 m³ de gas fueron consumidos por el fuego.

En el accidente ocurrido cerca de Buick, Canadá (2012), se produjo una rotura y un incendio en la tubería de recolección de gas de 16 pulgadas debido a una grieta preexistente. La rotura creó un cráter (17 metros de largo, 7,6 metros de ancho y 1,1 de profundidad) que expuso la tubería de recolección de gas de 6,625 pulgadas ubicada cerca en el mismo derecho de paso, pero sin dañarla. Aproximadamente 25 minutos después, esta tubería se rompió como resultado del sobrecalentamiento debido al choque de las llamas y el gas que se escapaba también se incendió contribuyendo a alimentar el fuego. 961.400 m³ de GN fueron consumidos por el fuego y 1,6 hectáreas de terreno resultaron quemadas.

4.4. Conclusiones

Los datos recopilados representan una fuente de referencia y contribuyen al progreso en la comprensión de los peligros y la evaluación de los riesgos en el transporte de gas natural por tuberías. El análisis de los datos muestra que las tuberías de entre 20 y 40 pulgadas de diámetro son las más comúnmente involucradas (70,6%) en los accidentes de cráteres. Respecto a la profundidad de entierro, la mayoría de las tuberías (52%) están instaladas a una profundidad de entre 1 y 2 metros. De acuerdo con el tipo de tubería, el 78% de los accidentes ocurrieron mayormente en tuberías de transmisión. En cuanto a la presión de operación, se observó que la tendencia es a operar a altas presiones (entre 50 y 70 bares). También, se encontró que la longitud más probable de una rotura de la tubería varía entre 1 y 30 metros. En lo que se refiere a las causas de los

accidentes, la corrosión fue la causa más frecuente, seguida por los fallos mecánicos y las actividades de terceros.

El análisis de los datos disponibles ha permitido obtener relaciones bastantes simples para describir la influencia de los parámetros de la tubería (que a su vez determinan el potencial energético de la rotura) sobre las dimensiones del cráter resultante. Se encontró que la longitud del cráter causado por la rotura de una tubería es linealmente proporcional a la longitud de la rotura por un factor de 1,15. De igual forma, la profundidad del cráter es linealmente proporcional a la profundidad de instalación de la tubería por un factor de 1,89. Respecto a la anchura del cráter, el parámetro de la tubería con el que tiene una mayor correlación es el diámetro de la tubería; sin embargo, el coeficiente de correlación encontrado entre estas variables es bajo por lo que no ha sido posible establecer una expresión de proporcionalidad.

Aunque el número de accidentes dominó en tuberías paralelas es bajo, se ha confirmado cuantitativamente la hipótesis intuitiva de que la formación de un cráter puede conducir a un efecto dominó: según los datos encontrados en la bibliografía, existe una probabilidad en tuberías paralelas de 0,194 de que la segunda tubería quede dentro del cráter y, por lo tanto, que esté sometida a un cierto riesgo de efecto dominó. En este sentido, la probabilidad de que esta tubería resulte afectada (*i.e.*, se rompa) por la carga térmica generada por el fuego de la rotura inicial es de 0,064. Si bien esta probabilidad es baja, la ocurrencia de un accidente dominó no debe ignorarse.

Por último, los resultados obtenidos pueden ser muy valiosos para establecer distancias de separación adecuadas en el diseño y construcción de tuberías paralelas, con el fin de prevenir cualquier daño a otras tuberías en caso de que la rotura de una tubería involucre la formación de un cráter, y evitar así el efecto dominó.

ANÁLISIS DEL EFECTO DOMINÓ EN TUBERÍAS

5.1. Introducción

Debido al aumento en la instalación de tuberías, a veces de forma paralela y con poca distancia de separación entre ellas, el nivel de interacción entre estos sistemas y la congestión –principalmente en zonas densamente pobladas– es cada vez mayor. Esta situación provoca un incremento en la probabilidad de ocurrencia de un accidente dominó, lo que significa que una pérdida de contención inicial en una tubería puede afectar a otra tubería cercana provocando nuevos accidentes. El efecto dominó puede ampliar la escala de un incidente y la gravedad de sus consecuencias.

Varios autores han evaluado el impacto de los escapes a alta presión en tuberías paralelas. Mohsin et al. (2014) estudiaron las distancias de seguridad de tuberías subterráneas de GN, analizando las posibles consecuencias de un accidente asociado con el escape de agua a alta presión de una tubería. Mazzola (1999) evaluó las consecuencias de los escapes de gas inflamable a alta presión, para diferentes tamaños de abertura en dos tuberías paralelas de GN. Otros autores (Hassan e Iqbal, 2006; Hassan y Ahmed, 2007; Majid et al., 2010, 2011a, 2011b, 2012; Majid y Mohsin, 2012, 2013; Mohsin et al., 2013, 2015) se han centrado en el análisis de fallos metalúrgicos en accidentes específicos en tuberías, causados por la acción de un chorro a alta presión que sale de una tubería fuente y dañando una segunda. Wang et al. (2011) analizaron el posible efecto dominó

en el caso de la pérdida de contención de una tubería, asociado a la radiación térmica, el choque de la presión de la explosión y la proyección de fragmentos.

Sin embargo, ninguno de estos autores se ha centrado en desarrollar un modelo que permita evaluar cómo este efecto dominó puede afectar la frecuencia de fallo de un sistema de tuberías dado. Una herramienta de este tipo sería muy útil en el análisis de riesgos de sistemas de transporte por tuberías.

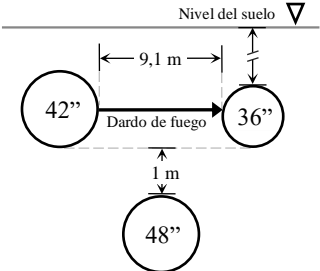
En este capítulo se presenta un nuevo enfoque para la evaluación del efecto dominó en tuberías. Se propone un modelo matemático, basado en un estudio histórico de accidentes de este tipo en tuberías, para estimar la probabilidad de efecto dominó en tuberías paralelas, aéreas o enterradas, asociada a un chorro de fluido y a la erosión o a los efectos térmicos resultantes. El modelo ha sido aplicado a dos escenarios accidentales diferentes.

5.2. Accidentes registrados debido al efecto dominó en tuberías

Después de una búsqueda en la literatura, se han encontrado nueve casos de accidentes dominó en tuberías paralelas. Cabe señalar que aquí sí se han considerado los accidentes causados por sabotaje, ya que el propósito era analizar la dinámica del efecto dominó y no la causalidad de los accidentes. La información disponible se resume en la Tabla 5-1.

El GN estuvo involucrado en ocho accidentes. La tubería fuente transportaba agua (cuatro casos), GN (cuatro casos) o petróleo (un caso). En tres casos tres tuberías estuvieron involucradas. La pérdida de contención inicial en la tubería fuente fue causada por corrosión, fallo mecánico o sabotaje (tres casos). Una vez aparecido el primer chorro de fluido, el tiempo hasta el fallo de la tubería objetivo era conocido en tres de los casos (20, 25 y 80 min). La distancia de separación entre las tuberías varió de 9 a 0,05 metros. En cuatro casos el fallo de la tubería objetivo fue debido a un dardo de fuego por el escape de petróleo (un caso) y de GN (tres casos). En uno de los casos con dardo de fuego de GN, la distancia entre ambas tuberías era de 7,9 metros y el tiempo hasta el fallo de la tubería objetivo fue de 20 minutos.

Tabla 5-1. Accidentes con efecto dominó en tuberías.

ID	Fecha, Lugar	Tubería fuente Diámetro / Material transportado / Grado / Revestimiento / Presión op.	Tubería objetivo 1	Tubería objetivo 2	Descripción del accidente	Configuración de las tuberías	Fuente
1	1984, Venezuela	8" / Petróleo / - / - / 51,7 bar	16" / GN / -	-	Un oleoducto de 8" se fracturó. El fluido liberado se incendió y el fuego causó la rotura (1,5") del gasoducto de 16". El chorro de fuego formado causó nuevas roturas. Las pérdidas económicas ascendieron a US\$ 81,9 millones.	-	MHIDAS, 2007
2	1990, EE. UU.	6" / Agua / Hierro fundido / - / -	4" / GN / Hierro fundido / - / 0,02 bar	-	Una fuga de agua de una grieta circunferencial en una tubería de 6" erosionó el suelo debajo del gasoducto de 4". Más tarde esta tubería se rompió, debido a las cargas del suelo sobre ella, liberando GN que eventualmente explotó y ardió. Un muerto y nueve heridos, así como dos casas destruidas.	-	NTSB, 1990
3	1995, Canadá	42" / GN / CSA X65 / Asfalto, Papel Kraft / 60,7 bar	36" / GN / Imprimación, asfalto, Papel Kraft / 60,7 bar	48" / GN / - / - / -	La corrosión bajo tensión causó la rotura (10,5 m longitudinalmente) del gasoducto enterrado de 42", que originó un cráter de 725 m ² de área. El gas liberado se incendió y el calor afectó al gasoducto de 36", provocando su rotura (8,5 m longitudinal). Una tercera tubería de gas de 48" fue expuesta al fuego, pero no se rompió. 19,6 millones de m ³ de gas fueron consumidos por el fuego.		TSB, 1997

Capítulo 5

ID	Fecha, Lugar	Tubería fuente	Tubería objetivo 1	Tubería objetivo 2	Descripción del accidente	Configuración de las tuberías	Fuente
		Diámetro / Material transportado / Grado / Revestimiento / Presión op.					
4	2003, Pakistán	30" / GN / Acero al carbono / - / 79,4 bar	24" / GN / Acero al carbono / - / 79,4 bar	-	Una explosión por sabotaje provocó la rotura (4"x10") del gasoducto aéreo de 30" situado sobre un canal de riego. El chorro de gas formado provocó una acción de arenado en el gasoducto enterrado de 24". Después de 80 minutos, esta tubería se rompió.		Hassan e Iqbal, 2006
5	2004, Pakistán	24" / GN / Acero al carbono / Asfalto / 99,3 bar	18" / GN / Acero al carbono / Asfalto / 99,3 bar	30" / GN / Acero al carbono / Polietileno / 99,3 bar	Una explosión por sabotaje provocó la rotura del gasoducto aéreo de 24". El gas liberado se incendió; el dardo de fuego formado incidió sobre el gasoducto aéreo de 18", el cual falló después de 20 minutos. La radiación térmica también afectó el recubrimiento del gasoducto de 30".		Hassan y Ahmed, 2007
6	2009, Malasia	6" / Agua / Asbesto / - / 10 bar	8" / GN / API 5L X42 / - / 18 bar	4" / GN / Polietileno / - / 3,5 bar	Una grieta en la tubería enterrada de 6" originó un chorro de agua; la acción de arenado creó un orificio (0,39") en el gasoducto de 8", originando un chorro de gas. Ambos chorros desplazaron el suelo de soporte debajo del gasoducto de 4", haciendo que éste se moviera hacia abajo hasta encontrarse en la dirección de impacto del chorro de gas. Posteriormente esta tubería también falló.		Majid et al., 2010, 2011a, 2011b, 2012; Majid y Mohsin, 2012

ID	Fecha, Lugar	Tubería fuente	Tubería objetivo 1	Tubería objetivo 2	Descripción del accidente	Configuración de las tuberías	Fuente
		Diámetro / Material transportado / Grado / Revestimiento / Presión op.					
7	2010, EE. UU.	6" / Agua / - / - / -	34" / Petróleo / API X52 / Cinta políken polietileno / 42,7 bar	-	La corrosión produjo tres orificios en la tubería enterrada de agua, uno de los cuales midió 5,1". El chorro de agua formado provocó una acción de arenado sobre el oleoducto de 34", creando un orificio (1,5"). 6.430 barriles se derramaron, causando pérdidas económicas por US\$ 46,6 millones.		NTSB, 2013a
8	2012, Malasia	18" / Agua / Acero 430 / Esmalte de asfalto con fibra de vidrio / 9 bar	8" / GN / API 5L X42 / Esmalte de alquitrán y fibra de vidrio / 17 bar	-	El fallo de la soldadura en la tubería enterrada de agua de 18" produjo un chorro de agua a alta presión. La acción de arenado creó tres orificios separados, de diferente tamaño, en el gasoducto de 8".		Majid y Mohsin, 2013; Mohsin et al., 2013, 2015
9	2012, Canadá	16" / GN / API X52 / Esmalte de asfalto / 66,5 bar	6,625" / GN / API 5L B / Polietileno extruido / 8,7 bar	-	Una rotura e ignición se produjo en el gasoducto enterrado de 16", formando un dardo de fuego que, 25 minutos después, provocó la rotura del gasoducto de 6,625" instalado cerca en el mismo derecho de vía. Las dos tuberías transportaban GN amargo, pero en direcciones opuestas.		TSB, 2013a

Las características de estos casos (Tabla 5-1) son esencialmente diferentes de las que se encuentran en las secuencias de efecto dominó producidas en plantas de proceso/almacenamiento, aunque puede haber alguna coincidencia. En el caso de las plantas, un número significativo de equipos (tanques, columnas, tuberías, etc.) están situados en un área relativamente reducida, con distancias de separación más bien cortas. Esto significa que la radiación térmica, la sobrepresión o la propagación de proyectiles tienen una alta probabilidad de alcanzar un elemento vulnerable, con frecuencia un tanque. Entre las diferencias significativas con respecto a los accidentes dominó en tuberías, se pueden destacar las siguientes (Reniers y Cozzani, 2013; Hemmatian et al., 2014): las principales causas iniciales en plantas son los fallos mecánicos y el factor humano, mientras que la contribución de la corrosión es muy baja; además, solamente el 10% de los sucesos iniciadores ocurrieron en tuberías en la planta y válvulas asociadas. Sin embargo, un aspecto es relativamente similar en ambos sistemas: la influencia de eventos externos, que en las plantas representan el 30% de los sucesos iniciadores, mientras que en las tuberías las actividades de terceros (a menudo maquinaria de excavación) alcanzan aproximadamente el 38%.

5.3. Posibilidades de efecto dominó

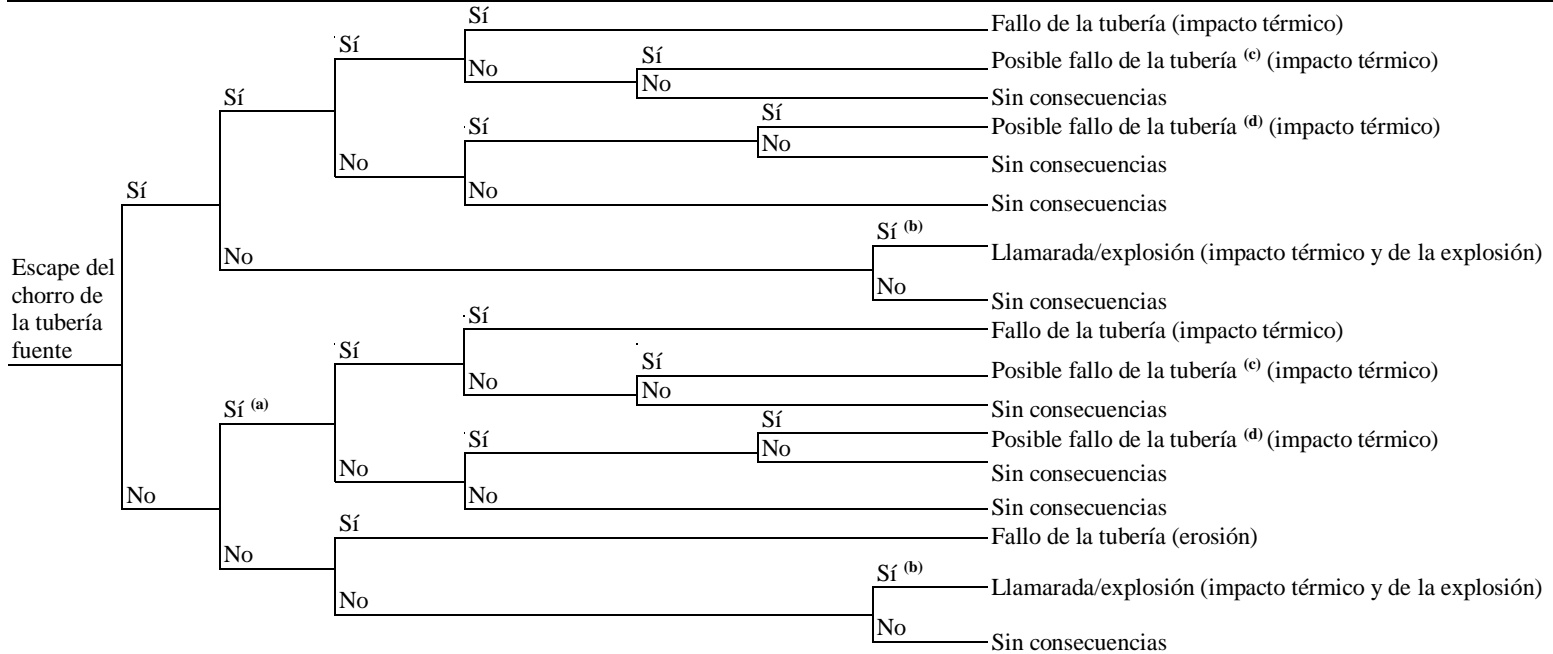
Una vez que se ha producido la primera pérdida de contención, el posible efecto dominó puede seguir diversas secuencias. Si hay un orificio en una tubería a presión, el fluido se liberará a una velocidad muy alta. En el caso de un gas, si $P_{tubería} / P_{exterior} > 1,9$ el gas saldrá a la velocidad del sonido; para líquidos o un flujo bifásico, la velocidad será menor. Esto puede tener efectos graves – asociados a la erosión y al impacto térmico– sobre otras tuberías vecinas. Sin embargo, la situación dependerá de si las tuberías son aéreas o enterradas. Otro aspecto importante es si el fluido liberado es o no inflamable; si es inflamable, es posible que ocurra la ignición en tuberías aéreas, y también en tuberías enterradas si la generación de un cráter por el escape inicial lo permite. Y, finalmente, en tuberías enterradas, la erosión dependerá de la probable existencia de un sólido abrasivo (arena o grava). Majid et al. (2008) realizaron pruebas para investigar el desgaste erosivo de tuberías de acero (grado API 5L X42) de GN sometidas a la acción de un chorro de agua-arena saliendo de un orificio de 5 mm de diámetro; encontraron una tasa máxima de adelgazamiento de la pared de $1,1 \times 10^{-5} \text{ m hr}^{-1}$.

Otro aspecto importante es la duración del escape. En tuberías aéreas, la pérdida de contención probablemente será detectada, mientras que en tuberías enterradas la detección será más difícil. Si la magnitud del escape es importante, la disminución de la velocidad de flujo o de la presión puede indicarlo. Sin embargo, si es relativamente pequeña, la detección puede ser difícil y, por lo tanto, la duración de la fuga puede ser mucho más larga (con frecuencia, pequeños caudales de escape en las tuberías de agua son ignorados). Las diversas secuencias posibles se resumen en el árbol de eventos de la Fig. 5-1.

El suceso iniciador es la pérdida de contención a través de un orificio en la tubería fuente. Existen dos posibilidades: tuberías aéreas o enterradas. En tuberías aéreas, si el fluido liberado es inflamable y se incendia, existe una cierta probabilidad de incidencia de las llamas sobre la tubería objetivo. Si esta tubería transporta un gas y no está lo suficientemente protegida contra el fuego, la probabilidad de fallo en un tiempo bastante corto es muy alta. Hemmatian et al. (2015) han centrado la atención sobre los altos flujos de calor en el caso de la incidencia directa de un dardo de fuego (véanse los valores dados en la Sección 4.5), y sobre el corto tiempo hasta el fallo (tan corto como unos pocos minutos en algunos casos) que puede ocurrir cuando la pared calentada no es mojada por un líquido. Sin embargo, si la tubería objetivo transporta un fluido a alta presión y considerable velocidad, el coeficiente de transferencia de calor al fluido interno puede ser suficiente para evitar el fallo.

Si la tubería objetivo transporta un flujo bifásico, también debería considerarse la posibilidad de fallo debido a la alta temperatura alcanzada por la pared de la tubería. En cambio, si transporta un líquido, éste actuará como refrigerante, enfriando la pared de la tubería y evitando su fallo. Sin embargo, el flujo puede estar interrumpido si las válvulas de bloqueo están cerradas; esto podría también conducir al fallo de la tubería. Por otra parte, si la forma de la llama del dardo de fuego es modificada por una disposición bastante congestionada y las llamas envuelven la tubería objetivo –sin ningún impacto directo del dardo de fuego– entonces esta tubería podría soportar la aportación calorífica recibida (Mazzola, 1999). Si no hay incidencia directa de las llamas, la tubería objetivo probablemente no se verá afectada. Sin embargo, si recibe una fuerte radiación térmica –y si transporta un gas– aún podría fallar.

Suceso iniciador	Tubería aérea	Ignición inmediata	Incidencia del chorro	Tubería objetivo: gas o flujo bifásico	Tubería objetivo bloqueada	Radiación térmica fuerte	Ignición retrasada	Escenario accidental
------------------	---------------	--------------------	-----------------------	--	----------------------------	--------------------------	--------------------	----------------------



(a) Solamente si el chorro o una primera explosión crean un cráter.
 (b) Dependiendo de las condiciones meteorológicas.
 (c) El calor del dardo de fuego aumentará la presión y podría aumentar la temperatura de la pared de la tubería.
 (d) El calentamiento de la pared de la tubería puede ser excesivo.

Fig. 5-1. Secuencias de efecto dominó tras el escape de un chorro de fluido a alta presión de la tubería fuente (Ramírez-Camacho et al., 2015).

Si el fluido liberado es inflamable y no hay ignición inmediata, es posible que ocurra un incendio de llamarada o una explosión (ignición retrasada); en este caso, ambas tuberías podrían resultar dañadas (explosión) o el dardo de fuego formado tras la llamarada podría afectar a la tubería objetivo.

Si ambas tuberías están enterradas, la situación es algo diferente. Si el fluido liberado es inflamable, aún existe la posibilidad de ignición, pero únicamente si el chorro liberado o una explosión crean un cráter. Si esto sucede, las diversas secuencias son similares a las comentadas previamente. Si no hay ignición pero el chorro de fluido incide sobre la tubería objetivo, éste arrastrará partículas sólidas y el chorro de fluido-sólido resultante será altamente abrasivo. Si el orificio en la tubería fuente es pequeño y el caudal liberado no es detectado, la probabilidad de que finalmente cause otra pérdida de contención en la tubería objetivo es bastante alta; incluso si el chorro no incide directamente sobre la tubería objetivo, la acción erosiva del chorro de fluido-sólido podría desgastarla (Hassan e Iqbal, 2006), disminuyendo su espesor de tal manera que podría ser incapaz de soportar la presión interior y finalmente fallaría. Por último, si no hay ignición inmediata pero el fluido liberado es inflamable, puede ocurrir un incendio de llamarada y/o una explosión. Esto sucederá si el gas liberado fluye a través del suelo y entra en la atmósfera, o si un líquido después de saturar el suelo fluye sobre la superficie y se evapora. Si esto ocurre y, además, se ha formado un cráter, el fuego viajará de nuevo hasta la salida del fluido y se producirá un dardo de fuego, con el consiguiente daño potencial a la tubería objetivo.

5.4. Modelado de la incidencia de un chorro sobre una tubería

Un chorro que sale de un orificio en una tubería fuente puede afectar una tubería objetivo cercana dependiendo de su dirección y de la configuración geométrica del sistema (*i.e.*, los diámetros de las tuberías, la distancia entre las tuberías y la ubicación del orificio en la tubería fuente). Consideremos una configuración sencilla de dos tuberías de iguales dimensiones. Un chorro puede tomar varias direcciones diferentes (Fig. 5-2a) dentro de un rango de π radianes (que corresponde al plano tangente a la pared de la tubería en la ubicación del orificio). Al mismo tiempo, cualquier orificio situado en la tubería fuente dentro de la mitad del perímetro adyacente a la tubería secundaria, puede incidir sobre la

tubería objetivo (Fig. 5-2b). El ángulo del chorro de fluido α_n cambiará con las propiedades del fluido y las circunstancias del entorno (Mohsin et al., 2014; Cushman-Roisin, 2014).

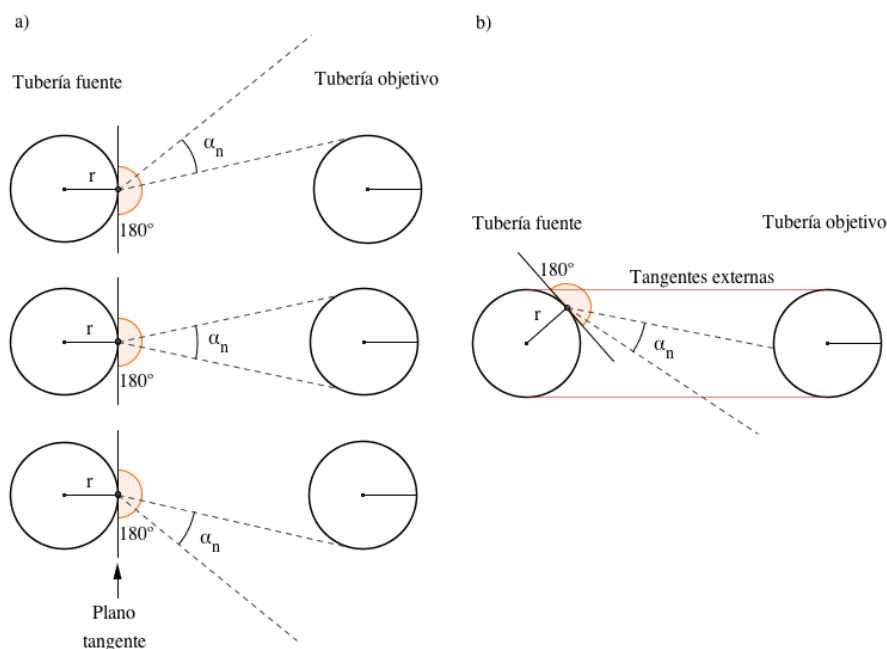


Fig. 5-2. Incidencia de un chorro de fluido entre tuberías de igual diámetro.

Así, la probabilidad de incidencia del chorro depende de i) la sección del perímetro de la tubería fuente donde la presencia de un orificio pueda generar un escenario de incidencia del chorro y ii) del ángulo y dirección de este chorro.

Ahora consideremos el caso general donde dos tuberías (una tubería fuente de radio r y una tubería objetivo de radio R) están situadas a una distancia de d metros entre sí (Fig. 5-3). Definamos Δ como el ángulo que delimita la sección del perímetro de la tubería fuente que puede contener un orificio emitiendo un chorro que puede incidir en la tubería objetivo. Cualquier chorro que salga del segmento delimitado por la sección angular $2\pi - \Delta$ no incidirá sobre la tubería objetivo. Δ se puede expresar como una función de R , r y d aplicando relaciones trigonométricas al triángulo sombreado de la Fig. 5-3, como Δ es el ángulo conjugado de θ (Δ y θ están delimitados por las tangentes externas a las dos circunferencias que representan tanto la tubería fuente como la tubería objetivo):

$$\Delta = 2 \left(\pi - \arccos \left(\frac{R - r}{d} \right) \right) \quad (5.1)$$

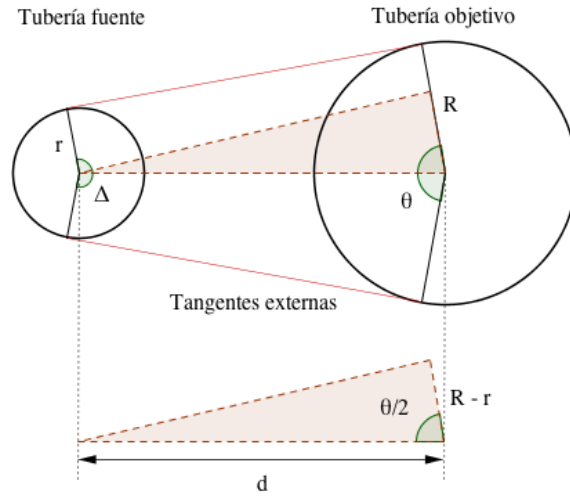


Fig. 5-3. Sector angular de la tubería fuente que puede contener orificios que impliquen riesgo de incidencia.

Consideremos ahora un chorro unidimensional que sale de un orificio situado en un ángulo δ dentro de la sección circular Δ (Fig. 5-4). El ángulo total de incidencia (*i.e.*, el rango de direcciones que el chorro unidimensional podría tomar implicando incidencia) se puede representar por 2β .

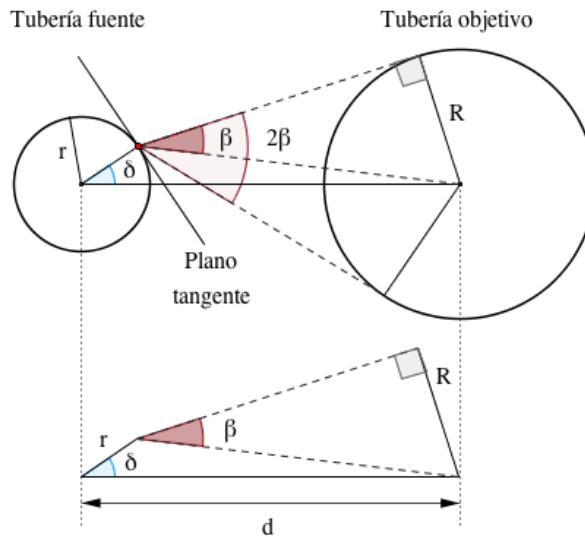


Fig. 5-4. Ángulo general cubierto por un chorro que puede afectar a la tubería objetivo.

El valor del ángulo β puede deducirse mediante el análisis de los dos triángulos contiguos representados en la Fig. 5-4:

$$\beta = \arcsin \frac{R}{\sqrt{d^2 + r^2 - 2rd \cdot \cos\delta}} \quad (5.2)$$

Nótese que β puede tener algunas restricciones físicas/geométricas en algunas regiones del segmento delimitado por Δ . Estas restricciones están relacionadas con la tangente interna entre ambas tuberías (Fig. 5-5).

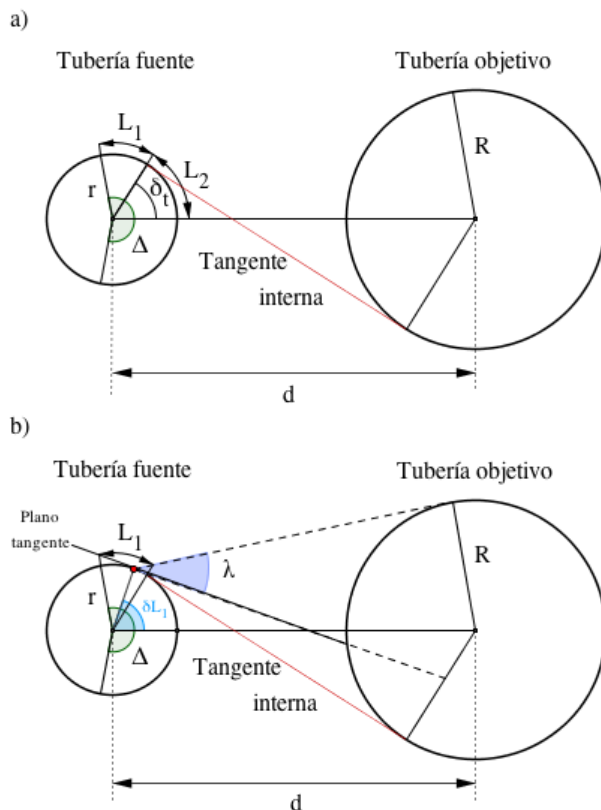


Fig. 5-5. Límites físicos del ángulo general que puede ser cubierto por un chorro de fluido.

Denominemos δ_t al ángulo que hace referencia a la posición del punto tangencial de la tubería fuente con una de las tangentes internas entre las circunferencias que representan ambas tuberías. δ_t a su vez, divide la sección del perímetro de la tubería fuente delimitado por $\Delta/2$ en dos segmentos: L_1 y L_2 . Si se forma un orificio dentro del segmento L_2 (Fig. 5-5a), 2β no tendrá ningún límite

geométrico, ya que el plano tangente al orificio del chorro caerá siempre por debajo de la tangente interna entre tuberías. Si se forma un orificio en el punto de intersección entre L_1 y L_2 , 2β todavía seguirá sin restricciones, ya que 2β se asentará o estará delimitado por la tangente interna. Sin embargo, si se forma un orificio dentro del segmento L_1 , el ángulo total que puede cubrir un chorro será siempre inferior a 2β , debido a que el plano tangente se ubicará por encima de la tangente interna. Este es el caso ilustrado en la Fig. 5-5b, donde el ángulo λ representa el estrecho rango que la dirección del chorro puede tomar saliendo de un orificio en L_1 .

5.4.1. Modelo probabilístico

Para evaluar la probabilidad de efecto dominó en tuberías, se deben considerar varios aspectos: la ubicación del orificio, la dirección del chorro y el ángulo sólido que perfila el chorro. Para mayor simplicidad, se propone un modelo de probabilidad para la incidencia de un chorro unidimensional (*i.e.*, no se tendrá en cuenta el ángulo sólido del chorro). Dadas dos tuberías (una tubería fuente de radio r y una tubería objetivo de radio R , siendo $r < R$) con sus centros separados d metros de distancia, la probabilidad (P) de que un chorro que sale de la tubería fuente impacte sobre la tubería objetivo se expresa como:

$$P = P_1 \cdot P_2 \tag{5.3}$$

donde P_1 es la probabilidad de que un orificio formado en la tubería fuente pueda implicar un riesgo de incidencia, y P_2 es la probabilidad de que un chorro que sale de un orificio con riesgo de incidencia pueda tener la dirección adecuada para alcanzar la tubería objetivo. P_1 se expresa como:

$$P_1 = \frac{\Delta}{2\pi} \tag{5.4}$$

P_2 dependerá de la ubicación exacta del orificio dentro del segmento delimitado por Δ , ya sea dentro del segmento L_1 o L_2 . Definamos P_{2-L_2} como la probabilidad de impacto de un chorro que sale de un orificio situado en el segmento L_2 , y P_{2-L_1} como la probabilidad de impacto de un chorro que sale de un orificio en L_1 .

De acuerdo con la Ec. (5.2), P_{2-L_2} puede escribirse como:

$$P_{2-L_2} = \frac{2\beta}{\pi} = \frac{2 \arcsin \frac{R}{\sqrt{d^2 + r^2 - 2rd \cdot \cos \delta_{L_2}}}}{\pi} \quad (5.5)$$

donde δ_{L_2} es el ángulo que delimita la posición de un orificio dentro del segmento L_2 (Fig. 5-6). Para simplificar, se ha considerado que el orificio está situado en el centro del segmento L_2 . Entonces:

$$\frac{\delta_{L_2}}{2\pi} = \frac{L_2/2}{2\pi r} \quad (5.6)$$

y, por lo tanto:

$$\delta_{L_2} = \frac{L_2}{2r} \quad (5.7)$$

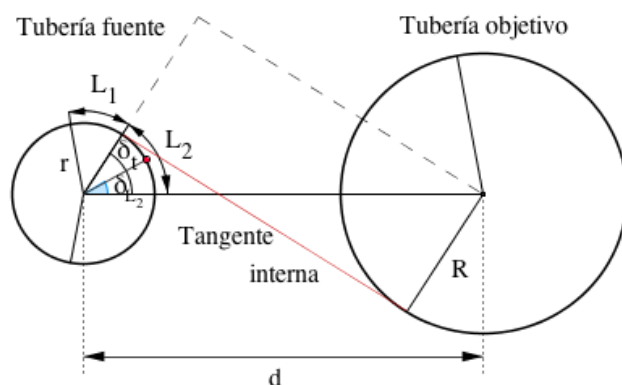


Fig. 5-6. Variables geométricas seleccionadas en relación con el modelo probabilístico.

A su vez, a partir de la Fig. 5-6 se pueden deducir las siguientes relaciones trigonométricas:

$$\delta_t = \arccos \left(\frac{R + r}{d} \right) \quad (5.8)$$

$$\delta_t = \frac{L_2}{r} \quad (5.9)$$

Combinando las dos últimas ecuaciones, la solución analítica para L_2 , y por lo tanto para P_{2-L_2} , está completamente definida:

$$L_2 = r \cdot \arccos \left(\frac{R + r}{d} \right) \quad (5.10)$$

Respecto a P_{2-L_1} , esta será menor que P_{2-L_2} debido a los límites físicos de β mencionados anteriormente. Por lo tanto, es razonable modelar esta probabilidad como:

$$P_{2-L_1} = q \cdot P_{2-L_2} \quad (5.11)$$

donde q es un factor de reducción cuyo valor varía entre 0 y 1. Se ha hecho una deducción fundamentada de q , basada en las configuraciones reales de tuberías encontradas en la revisión de la bibliografía (Tabla 5-1, ID 3, 4, 5, 6 y 9) y en otras disposiciones (véase el Apéndice G, apartados G.1, G.2 y G.3). Se encontraron los valores angulares para los posibles rangos de direcciones que un chorro unidimensional tomaría saliendo de un orificio situado en $L_2 / 2$ (*i.e.*, valores de 2β de configuraciones reales), así como la misma magnitud para un chorro saliendo de un orificio situado en $L_1 / 2$ (*i.e.*, los valores de λ para configuraciones reales). La relación entre ambos valores dio una estimación de q con un valor medio de 0,45 (véase el Apéndice H).

De P_{2-L_1} y P_{2-L_2} , P_2 se puede expresar como la combinación ponderada de ambas:

$$P_2 = s \cdot P_{2-L_1} + (1 - s) \cdot P_{2-L_2} \quad (5.12)$$

con:

$$s = \frac{L_1}{L_1 + L_2} \quad (5.13)$$

Finalmente, L_1 es:

$$L_1 = r \cdot \left(\frac{\Delta}{2} - \delta_t \right) \quad (5.14)$$

5.4.2. Resultados del modelo

La predicción a partir del modelo se puede observar en la Fig. 5-7. Se ha trazado la probabilidad de impacto del chorro para diversos escenarios de tubería fuente y

tubería objetivo del mismo diámetro (6, 12, 24, 36 y 48 pulgadas), como una función de diferentes distancias efectivas:

$$d' = d - 2r \tag{5.15}$$

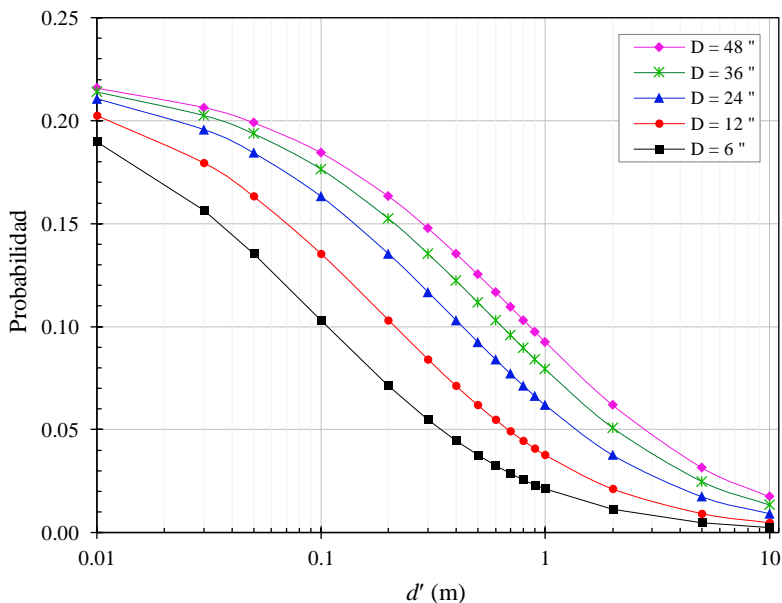


Fig. 5-7. Probabilidad de efecto dominó en función de la distancia entre las tuberías fuente y objetivo con el mismo diámetro, D .

Este modelo muestra claramente como la probabilidad de efecto dominó en la tubería objetivo aumenta, a medida que la distancia entre ambas tuberías disminuye (Fig. 5-7). Por ejemplo, para dos tuberías con $D = 12$ pulgadas, la probabilidad de incidencia es 0,135 para una distancia $d' = 0,1$ m, y disminuye a 0,038 si la distancia efectiva entre ambas tuberías aumenta hasta 1 m. El peor de los casos analizados ($d' = 0,01$ m) da probabilidades de efecto dominó en el rango de 0,19-0,22. La probabilidad es mayor para las tuberías con un diámetro más grande, debido al mayor tamaño del objetivo. Para grandes distancias de separación (*i.e.*, 10 m) –por lo tanto, sin posible efecto dominó–, la probabilidad teórica es inferior a 3×10^{-3} para el escenario de tuberías de 6 pulgadas y menor a 2×10^{-2} para los escenarios de tuberías de 48 pulgadas. Por otra parte, la probabilidad es la misma ($P = 0,116$) para todos los casos cuando la separación d' es D (datos no mostrados).

El modelo ha sido desarrollado para el caso general de tuberías fuentes más pequeñas (o iguales) en diámetro que las tuberías objetivo. Sin embargo, debido a la simetría del sistema geométrico, el modelo se puede reescribir fácilmente para los casos en los que la tubería fuente es mayor que la tubería objetivo (Fig. 5-8).

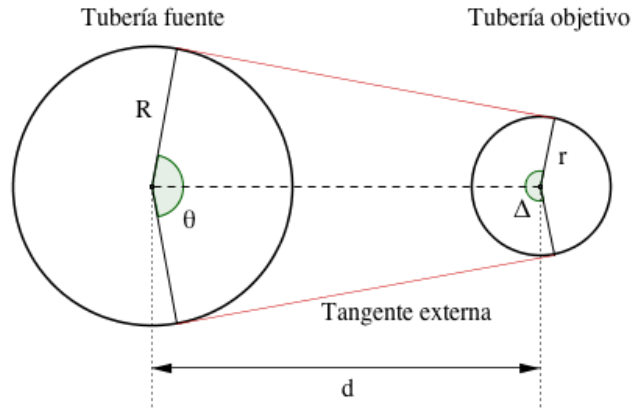


Fig. 5-8. Caso de una tubería fuente con mayor diámetro que la tubería objetivo.

Las ecuaciones modificadas para ser utilizadas –junto con las expresiones originales (5.1), (5.3), (5.11), (5.12) y (5.13)– en los casos en los que la tubería fuente es mayor que la tubería objetivo son las siguientes:

$$P_1 = 1 - \frac{\Delta}{2\pi} \quad (5.16)$$

$$P_{2-L_2} = \frac{2 \arcsin \frac{r}{\sqrt{d^2 + R^2 - 2Rd \cdot \cos \delta_{L_2}}}}{\pi} \quad (5.17)$$

$$\delta_{L_2} = \frac{L_2}{2R} \quad (5.18)$$

$$L_2 = R \cdot \arccos \left(\frac{R+r}{d} \right) \quad (5.19)$$

$$L_1 = R \cdot \left(\pi - \frac{\Delta}{2} - \delta_t \right) \quad (5.20)$$

En la Fig. 5-9 se ha representado la variación de la probabilidad de efecto dominó en función de la distancia para cinco de los escenarios encontrados en la revisión de la literatura. Cuatro de ellos (ID 3, 4, 5 y 9) tienen un diámetro de la tubería fuente mayor que el de tubería objetivo, mientras que el otro escenario (ID 6) tiene la tubería fuente más pequeña que la tubería objetivo. Este último escenario tenía una mayor probabilidad de efecto dominó (0,087) que los otros, debido a la distancia más corta entre las tuberías. El resto de los accidentes reportados tenían probabilidades inferiores a $1,5 \times 10^{-2}$, todos ellos con distancias de separación mayores a 6 m (excepto en el accidente ocurrido en Canadá en 2012, donde la distancia de separación entre las tuberías era de 3 m).

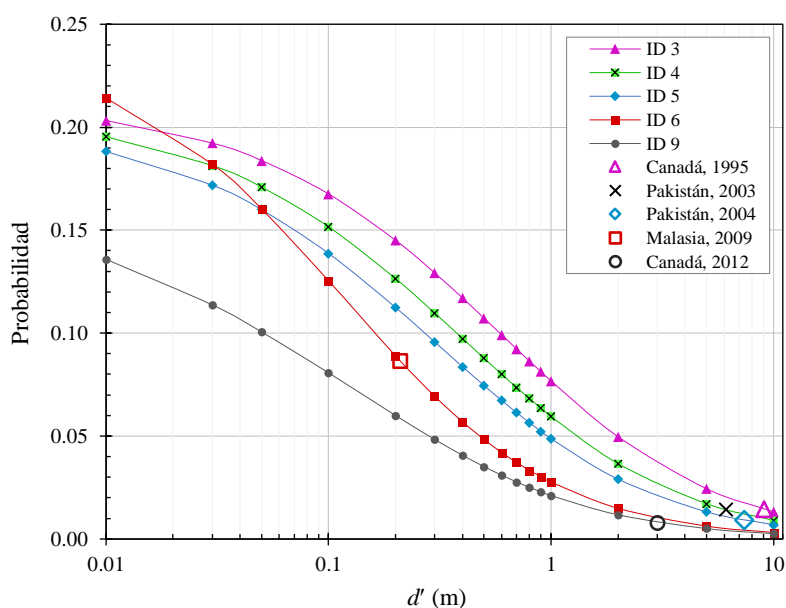


Fig. 5-9. Probabilidad de efecto dominó en función de la distancia entre las tuberías fuente y objetivo, para las configuraciones de la **Tabla 5-1** (ID 3, 4, 5, 6 y 9). Los símbolos con interiores abiertos corresponden a las distancias reales para cada escenario.

El modelo desarrollado permite explorar las diferencias entre sistemas (Fig. 5-10 y Fig. 5-11). Para una determinada tubería fuente, el modelo muestra cómo la probabilidad de efecto dominó aumenta con el diámetro de la tubería objetivo, ya que cuanto mayor sea la superficie expuesta de la tubería objetivo mayor es la probabilidad de que un chorro que sale de la tubería fuente impacte sobre ella.

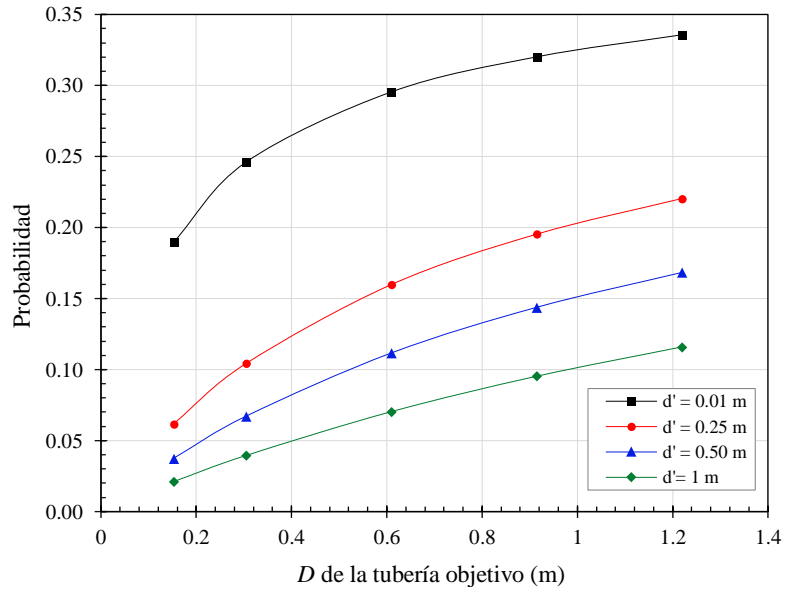


Fig. 5-10. Probabilidad de efecto dominó en función del diámetro de la tubería objetivo y la distancia entre tuberías, para una tubería fuente de 6 pulgadas de diámetro.

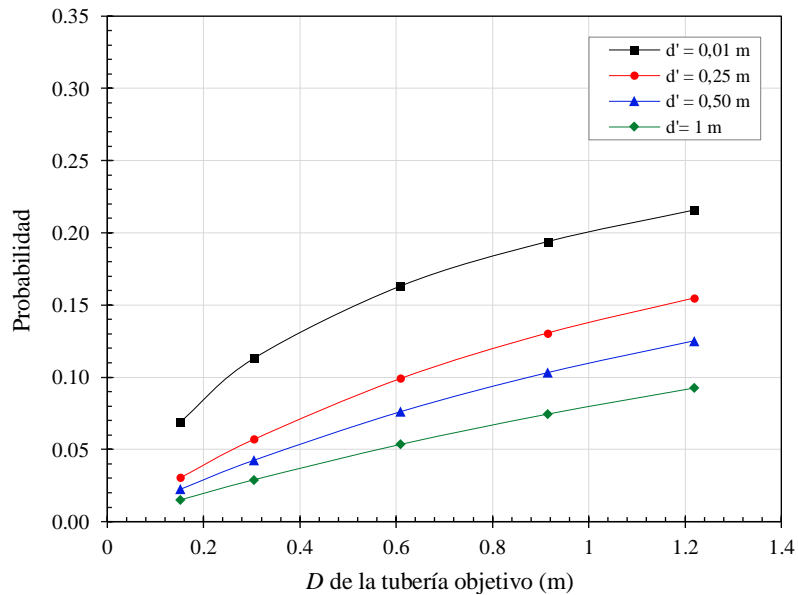


Fig. 5-11. Probabilidad de efecto dominó en función del diámetro de la tubería objetivo y la distancia entre tuberías, para una tubería fuente de 48 pulgadas de diámetro.

El modelo también permite explicar las diferencias originadas en función del diámetro de la tubería fuente. Por ejemplo, los datos en las Fig. 5-10 y Fig. 5-11

muestran como para tuberías objetivo pequeñas (*i.e.*, 6-12 pulgadas) y distancias efectivas cortas (menos de 0,25 m), la probabilidad de incidencia del chorro es de entre 2 y 2,7 veces más grande con una tubería fuente de 6 pulgadas que con una tubería fuente de 48 pulgadas. Para otros casos (tuberías objetivo de 24-48 pulgadas y distancias de 0,5 a 1 m), la probabilidad seguirá siendo mayor (1,3-2 veces) para tuberías fuente pequeñas.

5.5. Dardo de fuego

Si el chorro liberado es inflamable y la tubería es aérea o se ha formado un cráter, existe la posibilidad de ignición. Las fuentes de ignición suelen estar relacionadas con la actividad humana, el tráfico por carretera, etc.; por lo tanto, la probabilidad de ignición variará significativamente con las circunstancias del entorno. Si el chorro de fluido se incendia, entonces se producirá un dardo de fuego.

Los dardos de fuego están asociados a flujos de calor muy altos, ya que arrastran una gran cantidad de aire y la combustión es mucho mejor que en otros incendios accidentales. El efecto térmico en un equipo determinado o una tubería será el debido a la radiación térmica si no hay contacto directo con las llamas, o el asociado a la radiación y convección si hay incidencia directa de las llamas.

Aunque la radiación térmica disminuye rápidamente con la distancia, en algunos casos sus efectos sobre la pared de la tubería pueden ser peligrosos y pueden conducir al fallo. El caso más desfavorable ocurre cuando hay incidencia directa de las llamas, ya que el flujo térmico es muy alto; se pueden suponer los siguientes valores aproximados (Lowesmith et al., 2007; Kozanoglu et al., 2011; Bradley, 2012; Hemmatian et al., 2015):

- Gas natural: 200 kW m⁻².
- Gas propano: 300 kW m⁻².
- Propano, dos fases: 180 kW m⁻².

Una vez más, la posibilidad de incidencia directa depende de la posición relativa del orificio en la tubería fuente y de la tubería objetivo. Sin embargo, ahora aparece otro elemento: la distancia de la zona de despegue de la llama o *lift-off* (zona de no ignición). El *lift-off* es la distancia sobre la línea central desde el

punto de escape del gas hasta el inicio de la llama independiente y estabilizada; su magnitud puede ser determinante desde el punto de vista del efecto dominó térmico. Si una tubería está ubicada a una distancia de la tubería fuente más corta que la del *lift-off*, las llamas probablemente no la afectarán. En cuanto al alcance máximo de las llamas del dardo de fuego, este será la longitud de la llama visible más la del *lift-off*.

Se han propuesto diversos modelos para predecir la forma y tamaño de los dardos de fuego. Estas variables se pueden describir aproximadamente de forma sencilla para dardos de fuego verticales, pero la situación se vuelve más compleja cuando el dardo de fuego es horizontal o inclinado. En este caso, el dardo es recto, siguiendo el eje principal de salida del chorro, mientras que el alto impulso (momento o cantidad de movimiento) lo controla; sin embargo, se mueve hacia arriba debido a la flotabilidad a medida que la velocidad lineal en su interior disminuye. Por simplicidad, aquí solamente se comenta un modelo sencillo de dardo de fuego vertical; de hecho, también puede aplicarse a otras orientaciones de dardos de fuego de corta distancia. Las siguientes expresiones han sido propuestas para dardos de fuego de gas propano (Brzustowski, 1976; Palacios et al., 2009; Palacios y Casal, 2011).

Distancia de la zona de despegue de la llama (*lift-off*):

$$S = \frac{6.4\pi \cdot d_{\text{orificio}} \cdot u_j}{u_{av}} \quad (5.21)$$

Longitud de la llama:

$$L = 5,8 \cdot d_{\text{orificio}} \cdot Re^{0,27} \quad (5.22)$$

El contorno de las llamas de un dardo de fuego es difícil de definir. Aceptando que puede ser definido por la isoterma de 800 K –prácticamente el punto Draper (Howell et al., 2010)– se puede suponer que es un cilindro con un diámetro equivalente dado por:

$$D_{eq} = \frac{L}{7} \quad (5.23)$$

Este modelo implica un enfoque conservador, ya que predice longitudes algo más grandes que las diseñadas para dardos de fuego inclinados u horizontales. Fue

obtenido para el intervalo $5 \times 10^{-4} < Re < 5 \times 10^{-6}$. Para altos valores del número de Reynolds (Re), se deben aplicar modelos más complejos (Casal, 2008).

Así, para un dardo de fuego dado y un sistema de tuberías fuente y objetivo, habrá incidencia de las llamas si el dardo de fuego se dirige hacia la tubería objetivo y si la distancia efectiva entre ambas tuberías está en el rango $S < d' \leq (S + L)$ (véase la Fig. 5-12).

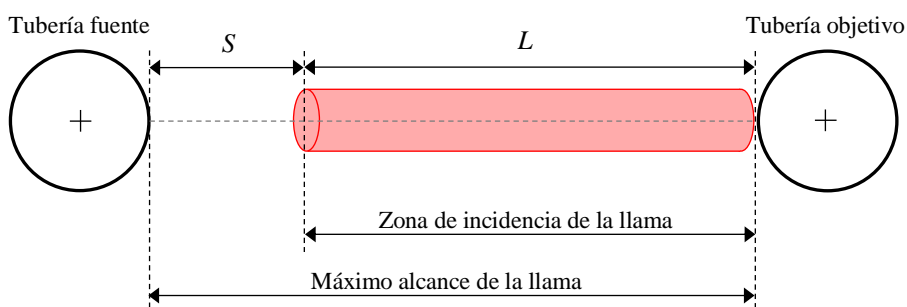


Fig. 5-12. Alcance de las llamas de un dardo de fuego.

Con este enfoque simplificado se puede estimar la probabilidad de fallo de la tubería objetivo. Si no hay incidencia directa de las llamas, pero sí radiación térmica únicamente, la evaluación de la probabilidad de daños en la tubería objetivo es mucho más compleja y no se trata aquí.

5.6. Frecuencia del efecto dominó

La frecuencia del efecto dominó puede estimarse a partir de la frecuencia de la pérdida de contención inicial en la tubería fuente y la probabilidad de daño a la tubería objetivo.

En cuanto a las frecuencias de fallo de la tubería, éstas dependerán de varios factores: el diámetro de la tubería, las medidas de protección y la ubicación (las agresiones de terceros en zonas urbanas podrían ser importantes; en zonas rurales se podrían esperar impactos naturales, tales como deslizamientos de tierra). Diversas instituciones han propuesto valores tomados de análisis históricos; la Tabla 5-2 muestra las frecuencias medias de fallos en tuberías de las bases de datos de PHMSA, TSB y CONCAWE (período 2004-2011).

Tabla 5-2. Frecuencias de fallo de las tuberías ($m^{-1} \text{ año}^{-1}$).

Tipo de fallo	PHMSA (2014b)	TSB (2014b)	CONCAWE (2013)
Rotura total	$3,05 \times 10^{-5}$	$4,30 \times 10^{-6}$	$8,35 \times 10^{-6}$
Orificio: $d > 10 \text{ mm}$ (máximo $\frac{1}{2} \text{ DN}$)	$9,71 \times 10^{-5}$	$1,37 \times 10^{-5}$	$2,66 \times 10^{-5}$

Si A se refiere a la tubería fuente y B a la tubería objetivo, la frecuencia de fallo de la tubería objetivo, $f(B)_{general}$, se puede calcular como:

$$f(B)_{general} = f(B/A) + f(B) \quad (5.24)$$

donde $f(B/A)$ es la frecuencia de fallo de la tubería objetivo debido a un fallo previo de la tubería fuente, y $f(B)$ es la frecuencia de fallo de la tubería objetivo, independientemente de la presencia de la tubería fuente.

$f(B/A)$ se calcula a partir de las frecuencias de fallo de tuberías de la Tabla 5-2 y las probabilidades explicadas anteriormente, y $f(B)$ se toma también de los valores de la Tabla 5-2, teniendo en cuenta que inicialmente cada tubería tiene su propia frecuencia de fallo, independientemente del hecho de estar situadas juntas. Por lo tanto:

$$f(B)_{general} = f(A) \cdot P_{dominó A \rightarrow B} + f(B) \quad (5.25)$$

En el caso de un dardo de fuego, también debe introducirse la probabilidad de ignición:

$$f(B)_{general} = f(A) \cdot P_{dominó A \rightarrow B} \cdot P_{ignición} + f(B) \quad (5.26)$$

La probabilidad de ignición dependerá de la existencia de fuentes de ignición, y cambiará a lo largo de toda la longitud de la tubería, aunque a veces puede utilizarse un valor medio. Dependerá también del fluido transportado; por ejemplo, EGIG (2015) propuso un valor medio de $2,3 \times 10^{-2}$ para el GN, aunque para zonas urbanas se asume un valor mínimo de 0,7 y un valor de 0,8 se utiliza con frecuencia.

Los siguientes ejemplos ilustran estos cálculos.

Escenario general: dos tuberías, una de 6 pulgadas de diámetro (fuente) y otra de 36 pulgadas de diámetro (objetivo), $d_{orificio} = 20$ mm en la tubería fuente. La frecuencia de pérdida de contención en la tubería fuente es $9,71 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (PHMSA, 2014b).

Caso 1: Erosión por un chorro abrasivo. Las dos tuberías están enterradas y separadas por $d' = 0,5$ m. La tubería fuente transporta agua y la tubería objetivo GN.

Caso 2: Incidencia de un dardo de fuego de gas. Las dos tuberías son aéreas y separadas por $d' = 0,5$ m. La tubería fuente transporta propano (20 °C, 6 bares) y la tubería objetivo GN. Se supone una probabilidad de ignición de 0,8.

Por lo tanto, utilizando las Ecs. (5.1–5.13) y (5.25–5.26), los valores obtenidos del cálculo de la probabilidad de incidencia del chorro en la tubería objetivo se muestran en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3. Probabilidad de incidencia y frecuencia de fallo de la tubería objetivo.

Parámetro	Caso 1	Caso 2
Δ	4,157 rad	3,897 rad
β	0,695 rad	0,492 rad
P_{2-L_2}	0,442	0,313
P_{2-L_1}	0,199	0,141
q	0,45	0,45
P_1	0,662	0,620
P_2	0,295	0,232
P	0,195	0,144
<i>Lift-off</i>	n.a.	^(a)
Re	-	3 827 200
S	-	0,25 m
L	-	6,9 m
$S + L$	-	7,15 m ^(b)
D_{eq}	-	0,98 m
$f(B)_{general}$	$9,71 \times 10^{-5} \times 0,195 + 9,71 \times 10^{-5} = 1,16 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1} \text{ año}^{-1}$	$9,71 \times 10^{-5} \times 0,144 \times 0,8 + 9,71 \times 10^{-5} = 1,08 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1} \text{ año}^{-1}$

^(a) Asumiendo un flujo estrangulado ($P_{estrangulamiento} = 3,4$ bar, $T_{estrangulamiento} = 272$ K) con una velocidad de salida de 243 m s^{-1} (velocidad del sonido en el propano).

^(b) La distancia de separación entre las tuberías está incluida en el rango de $S < d' \leq (S+L)$, por lo que si el dardo de fuego está orientado hacia la tubería objetivo habrá impacto de las llamas.
n.a. No aplicable.

5.7. Conclusiones

El análisis realizado demuestra que la frecuencia de fallo asociada al efecto dominó depende de la geometría del sistema, es decir, de los diámetros de las tuberías y la distancia de separación entre ellas. Se ha desarrollado un modelo matemático para estimar la probabilidad de efecto dominó en tuberías. Este modelo se ha resuelto mediante la aplicación de un componente empírico, que ha sido establecido de acuerdo con la configuración de los escenarios accidentales encontrados en el estudio de la literatura. El modelo permite analizar la influencia de diversas variables sobre la probabilidad del efecto dominó. Se ha observado que esta probabilidad disminuye a medida que la distancia entre ambas tuberías aumenta, y a medida que el diámetro de la tubería objetivo disminuye y el diámetro de la tubería fuente aumenta.

Cabe destacar que, para distancias de separación cortas y grandes diámetros de la tubería objetivo, la probabilidad puede alcanzar valores significativos, entre 0,2 y 0,3; estos valores tienen importantes implicaciones en materia de seguridad, ya que esta probabilidad implica directamente un incremento de la frecuencia de fallo general de la tubería. La utilización de frecuencias teniendo en cuenta la probabilidad de efecto dominó, proporcionará resultados de análisis de riesgos más realistas y precisos, lo que ha de facilitar la consecución de una mayor seguridad.

CONCLUSIONES

El trabajo realizado en la presente tesis doctoral ha permitido llegar a las siguientes conclusiones:

1. Pese a ser una modalidad de transporte esencialmente segura, en comparación con otras, el transporte de materiales peligrosos por tubería tiene un cierto potencial de riesgo, y siguen ocurriendo eventos de pérdida de contención y accidentes cuyas consecuencias pueden ser muy importantes.
2. El análisis histórico, cuyos resultados pueden considerarse significativos y representativos teniendo en cuenta el gran número de casos estudiados, ha demostrado que la causa más frecuente de los accidentes han sido las actividades de terceros (37,7%), seguidas por la corrosión (20,9%) y los fallos mecánicos (19,5%).
3. En casi todos los accidentes analizados, los materiales involucrados eran inflamables; por consiguiente, los incendios fueron los eventos peligrosos más comunes, seguidos por las explosiones.
4. Las consecuencias de estos eventos sobre la salud han sido la muerte y lesiones de personas en un número significativo de accidentes. Los impactos al medio ambiente están relacionados con la contaminación del suelo y cuerpos de agua.
5. Se han desarrollado árboles de eventos para las diferentes categorías de sustancias identificadas en los casos analizados (gases comprimidos,

gases licuados a presión, líquidos de baja volatilidad y líquidos volátiles), así como para las posibilidades de efecto dominó en tuberías paralelas. Estos árboles muestran de forma esquemática la evolución de los accidentes tras la pérdida de contención de los materiales peligrosos, lo cual permite una aplicación rápida y práctica al Análisis Cuantitativo de Riesgos (ACR) en tuberías.

6. Una de las mayores incertidumbres en el ACR es la estimación de la frecuencia de ocurrencia de los diferentes eventos que pueden suceder tras un evento peligroso inicial. El tratamiento estadístico de los datos correspondientes al análisis histórico ha permitido calcular las probabilidades condicionales para cada secuencia de los árboles de eventos posteriores a la liberación, asociadas a las sustancias peligrosas identificadas en los registros históricos. Los resultados obtenidos se consideran de gran interés para cuantificar el riesgo asociado con el uso de esta modalidad de transporte.
7. Dada la importancia de la formación de un cráter en tuberías enterradas, se han identificado los parámetros de la tubería que determinan las dimensiones del cráter formado por la rotura abrupta de ésta, pese a la escasez de datos disponibles en la literatura. Este análisis ha permitido obtener relaciones de proporcionalidad, las cuales pueden ampliarse para incluir nuevos parámetros, como por ejemplo el tipo de suelo, una vez se disponga de más información.
8. El análisis de los diversos accidentes ocurridos confirma que cuando se instalan tuberías paralelas en el mismo pasillo, es probable que una pérdida de contención en una de ellas afecte a otras, por lo que esta posibilidad no debe ignorarse. Se ha determinado que el efecto dominó está asociado esencialmente a dos posibles daños: la erosión por un chorro abrasivo de fluido-sólido en tuberías enterradas, o el impacto térmico por un dardo de fuego (sustancias inflamables) en tuberías aéreas, pero también en tuberías enterradas si se ha formado un cráter.
9. Se ha analizado la influencia de dicho efecto dominó en la frecuencia de fallo del sistema, obteniéndose una expresión para el cálculo de la misma.

10. Aunque el transporte por tubería no está incluido en la Directiva Seveso (Directiva 2012/18/UE), el trabajo realizado en esta tesis hace evidente que la aplicación sistemática del Análisis Cuantitativo de Riesgos a esta actividad y a estas instalaciones implicaría una disminución de su riesgo, con la consiguiente repercusión en la ordenación del territorio («*land-use planing*»).

The work carried out in this doctoral thesis has led to the following conclusions:

1. Despite being an essentially safe mode of transport, compared to others modes, the transport of hazardous materials by pipeline has a certain potential of risk, and events of loss of containment and accidents continue to occur whose consequences can be very important.
2. The historical analysis, whose results can be considered significant and representative taking into account the large number of cases studied, has shown that the most frequent cause of accidents have been the activities of third parties (37,7%), followed by the corrosion (20,9%) and mechanical failures (19,5%).
3. In almost all the accidents analysed, the materials involved were flammable; therefore, the fires were the most common dangerous events, followed by explosions.
4. The consequences of these events on health have been the death and injury of people in a significant number of accidents. Impacts on the environment are related to the pollution of soil and water bodies.
5. Event trees have been developed for the different categories of substances identified in the cases analysed (compressed gases, liquefied gases, low volatile liquids and volatile liquids), as well as for the possibilities of domino effect in parallel pipelines. These trees show in a schematic way the evolution of the accidents after the loss of containment of the dangerous materials, which allows a quick and practical application to Quantitative Risk Analysis (QRA) in pipelines.
6. One of the greatest uncertainties in QRA is the estimation of the frequency of occurrence of the different events that can occur after an

initial dangerous event. The statistical treatment of the data pertaining to the historical analysis has allowed calculating the conditional probabilities for each sequence of the trees of post-release events, associated with a range of hazardous substances identified in the historical records. The results obtained are deemed of great interest for quantifying the risk associated with the use of this modality of transport.

7. Given the importance of the formation of a crater in buried pipelines, the parameters of the pipeline that determine the dimensions of the crater formed by the abrupt rupture of it have been identified, despite the scarcity of data available in the literature. This analysis has allowed to obtain proportionality relationships, which can be extended to include new parameters, such as soil type, once more information is available.
8. The analysis of the diverse accidents occurred confirm that when parallel pipelines are installed in the same hallway, the possibility of a loss of containment in one of them affecting the others should not be neglected. The so-called domino effect has been observed to be essentially associated to two potential damages: erosion by a fluid-solid abrasive jet in buried pipelines, or thermal impact of a jet fire (flammable substances) in aerial pipelines, but also in buried pipelines if a crater has formed.
9. The influence of this domino effect on the failure frequency of the system has been analysed, obtaining an expression for the calculation thereof.
10. Although pipeline transport is not included in the Seveso Directive (Directive 2012/18/UE), the work carried out in this thesis makes evident that the systematic application of the Quantitative Risk Analysis to this activity and to these facilities would imply a reduction of its risk, with the consequent impact on land-use planning.

NOMENCLATURA

a	Longitud media del cráter en el eje x (m)
A	Tubería fuente
A_c	Área del cráter (m ²)
b	Anchura media del cráter en el eje y (m)
B	Tubería objetivo
c	Profundidad del cráter en el eje z (m)
d	Distancia entre los centros de las tuberías (m)
$d_{orificio}$	Diámetro del orificio (m)
d'	Distancia efectiva (m)
D	Diámetro de la tubería (m)
D_{ac}	Diámetro del cráter aparente (m)
D_{eq}	Diámetro equivalente del dardo de fuego (m)
D_{tc}	Diámetro del cráter verdadero (m)
$f(A)$	Frecuencia de fallo de la tubería fuente (m ⁻¹ año ⁻¹)
$f(B), f(B)_{general}$	Frecuencia de fallo de la tubería objetivo (m ⁻¹ año ⁻¹)
$f(B/A)$	Frecuencia de fallo de la tubería objetivo debido al efecto dominó (m ⁻¹ año ⁻¹)
H	Altura del cráter (m)
H_{ac}	Profundidad aparente del cráter (m)
H_{tc}	Profundidad verdadera del cráter (m)
L	Longitud de las llamas del dardo (m)
L_r	Longitud de la rotura de la tubería (m)
L_1	Sección de la tubería fuente delimitada por las tangentes internas y externas entre ambas tuberías (m)
L_2	Sección de la tubería fuente delimitada por la tangente interna entre las tuberías y la línea que une sus centros (m)
P_d	Profundidad de instalación de la tubería (m)
$P, P_{dominó A \rightarrow B}$	Probabilidad de efecto dominó (adimensional)
P_1	Probabilidad de que un orificio en la tubería fuente pueda implicar impacto (adimensional)
P_2	Probabilidad de que un chorro de un orificio con riesgo de impacto pueda alcanzar la tubería objetivo (adimensional)

Nomenclatura

P_{2-L_1}	Probabilidad de impacto de un chorro de un orificio situado en L_1 (adimensional)
P_{2-L_2}	Probabilidad de impacto de un chorro de un orificio situado en L_2 (adimensional)
$P_{exterior}$	Presión al exterior de la tubería (bar, psi)
$P_{ignición}$	Probabilidad de ignición del chorro (adimensional)
$P_{tubería}$	Presión al interior de la tubería (bar, psi)
q	Factor de reducción (adimensional)
r	Radio de la tubería fuente (m)
R	Radio de la tubería objetivo (m)
Re	Número de Reynolds (adimensional)
s	Factor de proporción (adimensional)
S	Zona de despegue de la llama o <i>Lift-off</i> (m)
T_1	Tubería fuente
T_2	Tubería objetivo
u_{av}	Velocidad media del chorro ($m \cdot s^{-1}$)
u_j	Velocidad del chorro en la salida del gas ($m \cdot s^{-1}$)
V_c	Volumen del cráter (m^3)

Abreviaturas

ACR	Análisis Cuantitativo de Riesgos
AHA	Análisis Histórico de Accidentes
BD1	Base de Datos 1 – contiene accidentes recopilados de MHIDAS
BD2	Base de Datos 2 – contiene accidentes recopilados de otras fuentes
DN	Diámetro Nominal (in o m)
GLP	Gas Licuado del Petróleo
GN	Gas Natural
LGN	Líquidos del Gas Natural
T1	Tubería uno o tubería fuente
T2	Tubería dos o tubería objetivo
VCE	Explosión de Nube de Vapor, por su nombre en español

Símbolos griegos

α_n	Ángulo del chorro (rad)
β	Medio ángulo sólido de impacto del chorro (rad)
δ	Ángulo que delimita la posición de un orificio (rad)
δ_{L_2}	Ángulo que delimita la posición de un orificio dentro de L_2 (rad)

δ_t	Ángulo que da la intersección entre L_1 y L_2 (rad)
Δ	Ángulo formado por las tangentes externas de dos tuberías, delimitando un sector circular en la tubería más pequeña (rad)
θ	Ángulo formado por las tangentes externas de dos tuberías, delimitando un sector circular en la tubería más grande (rad)
λ	Ángulo que cubre el rango que la dirección del chorro puede tomar saliendo de un orificio situado en L_1 (rad)
π	Número que representa la relación entre la longitud de una circunferencia y su diámetro en geometría euclidiana

- Acton, M. R., Jackson, N. W., & Jager, E. E. (2010, September). Development of Guidelines for Parallel pipelines. In *8th International Pipeline Conference*, 485–495. American Society of Mechanical Engineers. Alberta, Canada.
- Alileche, N., Cozzani, V., Reniers, G., & Estel, L. (2015). Thresholds for domino effects and safety distances in the process industry: A review of approaches and regulations. *Reliability Engineering & System Safety*, 143, 74–84.
- Andrews, R. M., Millwood, N. A., Batte, A., & Lowesmith, B. J. (2004). The fracture arrest behaviour of 914 mm diameter X100 grade steel pipelines. In *ASME Proceedings of the 5th International Pipeline Conference*, 1693–701. Alberta, Canada.
- API (American Petroleum Institute). (2013). *Guidelines for the Definition of Onshore Gas Gathering Lines* (1st Ed.). Reafirmado: Enero 2013. Washington, D.C.
- API (American Petroleum Institute). (2016). *Publications Programs and Services*. En www.api.org (Fecha de acceso: Diciembre 10, 2016).
- APSC (Alyeska Pipeline Service Company). (2013). *Trans-Alaska Pipeline System FACTS: A collection of facts compiled over the duration of the operation of the Trans Alaska Pipeline System*. En www.alyeska-pipe.com (Fecha de acceso: Diciembre 16, 2015). Alaska.
- ARIA (Analysis, Research and Information on Accidents). (2009). Rupture and ignition of a gas pipeline, 30 July 2004, Ghislenghien, Belgium. *Report No. 27681*. France.
- ARIA (Analysis, Research and Information on Accidents). (2014a). French Ministry of Ecology, sustainable development and energy. En www.aria.developpement-durable.gouv.fr (Fecha de acceso: Octubre 15, 2014). Francia.

Referencias

- ARIA (Analysis, Research and Information on Accidents). (2014b). French Ministry of Ecology, Sustainable Development and Energy. *Report N° 25217*. France.
- ASME (American Society of Mechanical Engineers). (2002). *ASME B31.4-2002: Pipeline Transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids*. New York.
- ASME (American Society of Mechanical Engineers). (2004). *ASME B31.8-2003: Gas Transmission and Distribution Piping Systems*. New York.
- Bahadori, A. (2015). *Essentials of Coating, Painting, and Lining for the Oil, Gas and Petrochemical Industries*. Massachusetts, U.S.: Gulf Professional Publishing.
- Bahadori, A. (2016). *Oil and Gas Pipelines and Piping Systems: Design, Construction, Management, and Inspection*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
- BAM (German Federal Institute for Materials Research and Testing). (2009). *Research Report 289: On the risks of transporting liquid and gaseous fuels in pipelines Research report*. Berlin, Germany.
- Barry, G., & Bubar, P. E. (2011). Chapter 10: Valve stations. In Menon (Ed.), *Pipeline Planning and Construction Field Manual* (p. 205–222). Amsterdam: Elsevier.
- Bartenev, A. M., Gelfand, B. E., Makhviladze, G. M., & Roberts, J. P. (1996). Statistical analysis of accidents on the Middle Asia-Centre gas pipelines. *Journal of Hazardous Materials*, 46, 57–69.
- BBC News. (2009). *Gas blast causes fire in Moscow*. En UK - BBC News www.bbc.com/news/uk (Fecha de acceso: Enero 22, 2016).
- Boot, H. (2013). The use of risk criteria in comparing transportation alternatives. *Chemical Engineering Transactions*, 31, 199–204.
- Bradley, I. (2012). Severe jet fires and vapor explosions. *Hydrocarbon Processing*, May, T85–T88.
- Brzustowski, T. A. (1976). Flaring in the energy industry. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2 (3), 129–141.
- Bubbico, R., Mazarotta, B., & Verdone, N. (2014). CFD analysis of the dispersion of toxic materials in road tunnels. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 28, 47–59.

- Casal, J., Cisteró, J., & Tort, J. M. (1995). Some risks of energy distribution. Analysis of an explosion involving electrical and gas networks. *Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries*, 1, 565–575.
- Casal, J. (2008). *Evaluation of the effects and consequences of major accidents in industrial plants* (vol. 8). Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
- Casal, J., Montiel, H., Planas, E., & Vílchez J. A. (2009). *Análisis del riesgo en instalaciones industriales*. Barcelona, España: Ediciones UPC.
- Casal, J., & Vílchez, J. A. (2010). El riesgo químico y el territorio. *Revista Catalana de Seguretat Pública*, 23, 127–152.
- Chicago Tribune. (2005). Ford City Mall Explosion. En *Featured Articles from the Chicago Tribune* <http://articles.chicagotribune.com/> (Fecha de acceso: Enero 22, 2016).
- CIA (Central Intelligence Agency). (2017). The World Factbook: Pipelines. En <https://www.cia.gov> (Fecha de acceso: Julio 24, 2017).
- CONCAWE (European Oil Company Organization for Environment, Health and Safety). (2013). *Performance of European cross-country oil pipelines. Statistical summary of reported spillages in 2012 and since 1971*. Brussels, Belgium.
- Cooper, P. W. (1996). *Explosives engineering*. New York, NY: Wiley-VCH.
- COWI, (2011). Assessing the case for EU legislation on the safety of pipelines and the possible impacts of such an initiative. *Report ENV.G.1/FRA/2006/0073*. Lyngby, Dinamarca.
- Cox, A. W., Lees, F. P., & Ang, M. L. (1990). *Classification of hazardous locations*. IChemE.
- Cozzani, V., Gubinelli, G., & Salzano, E. (2006). Escalation thresholds in the assessment of domino accidental events. *Journal of Hazardous Materials*, 129 (1), 1-21.
- Cushman-Roisin, B. (2014). *Environmental fluid mechanics*. New York, NY: John Wiley and Sons, Inc.
- Daily Kent Stater. (1979). Evacuation follows explosion. Official student newspaper of Kent State University. En *Google News Archive Search* www.news.google.com (Fecha de acceso: Julio 6, 2015).
- De Haag, P. U., & Ale, B. J. M. (2005). *Guidelines for Quantitative Risk Assessment: Purple Book*. Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (VROM). Netherlands.

Referencias

- Delvosalle, C. (1996, September). Domino effects phenomena: definition, overview and classification. In *First European Seminar on Domino Effects*. Leuven, Belgium.
- Delvosalle, C., Fievez, C., & Benjelloun, F. (1998). Development of a methodology for the identification of potential domino effects in "SEVESO" industries. In *Proceedings 9th International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries*, 3, 1252–1261.
- Deutsche Welle. (2014). Excavation worker killed in Ludwigshafen gas pipe explosion. En *Deutsche Welle Germany's international broadcaster www.dw.com* (Fecha de acceso: Enero 22, 2016).
- Diaz, J. P. (2015). *Sistemas de energías renovables*. Madrid, España: Editorial Paraninfo.
- Directiva 2012/18/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de julio de 2012, relativa al control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas y por la que se modifica y ulteriormente deroga la Directiva 96/82/CE. *Diario Oficial de la Unión Europea* 24/07/2012, L197, 1–37.
- DOT (Department of Transportation). (2002). *Corrective Action Order CPF No. 3-2002-1003-H*. Washington, D.C.
- DOT (Department of Transportation). (2008). Rupture of Houstonia 200-Line operated by Panhandle Eastern Pipeline Company, LP, Pilot Grove, Missouri, August 25, 2008. *Pipeline Failure Investigation Report No. 20090030 – 5319*. Washington, D.C.
- DOT (Department of Transportation). (2009). *Corrective Action Order CPF No. 3-2009-1009-H*. Washington, D.C.
- DRC (Dakota Resource Council). (2014). *Update: Pipeline Explosion in Northwest Minnesota Ruled Accidental* – Valley News Live. En <http://drcinfo.org/> (Fecha de acceso: Enero 28, 2016).
- Dziubiński, M., Frątczak, M., & Markowski, A. S. (2006). Aspects of risk analysis associated with major failures of fuel pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19 (5), 399–408.
- EGIG (European Gas Pipeline Incident Data Group). (2008). *Gas pipeline incidents: 7th Report of the European Gas Pipeline Incident Data group (period 1970–2007)*. Doc. Number EGIG 08.TV-B.0502.

- EGIG (European Gas pipeline Incident Data Group). (2015). *Gas pipeline incidents: 9th Report of the European Gas pipeline Incident Data group* (period 1970 – 2013). Doc. Number EGIG 14.R.0403.
- EIA (U.S. Energy Information Administration). (2017). *International Energy Statistics: Natural gas consumption*. En www.eia.gov (Fecha de acceso: Marzo 31, 2017).
- El Universal. (2011). Explosión de ducto deja cráter de 20 metros en NL. En *Archivo – El Universal* www.eluniversal.com.mx (Fecha de acceso: Julio 6, 2015).
- European Commission. (2009). Gas Coordination Group: supplies in South Eastern Europe under control after gas pipeline explosion. Official website of the European Union <http://europa.eu/> (Fecha de acceso: Julio 6, 2015).
- Evening Independent. (1961). Workmen clean up scene of gas pipeline explosion. En *Google News Archive Search* www.news.google.com (Fecha de acceso: Julio 6, 2015).
- Exponent. (2015). PG&E Line 118B Fresno In-Service Rupture Analysis. Exponent, Inc. *Failure Analysis Associates*. Doc. No. 1502991.000 - 7356. California.
- Fokin, V. A. (2000). Determination of the Parameters of a Crater Produced by a Nuclear Explosion. *Atomic Energy*, 89 (3), 760–766.
- Folga, S. M. (2007). *Natural gas pipeline technology overview* (No. ANL/EVS/TM/08-5). Argonne National Laboratory (ANL), Illinois.
- GESIP (Groupe d'Étude de Sécurité des Industries Pétrolières et Chimiques). (2014). *Guide méthodologique pour la réalisation d'une étude de dangers concernant une canalisation de transport (hydrocarbures liquides ou liquéfiés, gaz naturel ou assimilé et produits chimiques)*. Guide Professionnel GESIP n° 2008/01. Paris, France.
- Girgin, S., & Krausmann, E. (2014). Analysis of pipeline accidents induced by natural hazards. *JRC Technical Report No. 88410*. European Union.
- GPO (U.S. Government Publishing Office). (2010). General Construction Requirements for Transmission Lines and Mains: Cover. In *Code of Federal Regulation 49 CFR 192.327*. Washington, D.C.
- Guidi, G., Ludovisi, G., & Mazzarotta, B. (2001). Methodological approach for the evaluation, in economic terms, of the risk from industrial plants

Referencias

- subject to Council Directive 96/82/EC (Seveso II). In *Proceedings of the European conference on safety and reliability—ESREL* (vol. 1), 521–528).
- Han, Z. Y., & Weng, W. G. (2010). An integrated quantitative risk analysis method for natural gas pipeline network. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 23 (3), 428–436.
- Hansen, S. M., Nordyke, M. D., Rawson, D. E., Sherman, W. C., Spruill, J. L., Steinriede, W. L., & Toman, J. (1964). Recommended explosion-crater nomenclature. *Geophysics*, 29 (5), 772–773.
- Hansen, S. M. (1968). A crater formed by gas erosion of a nuclear explosion vent. *Meteoritics*, 4 (2), 61–87.
- Hansler, R. J., Ham, J. M., & Laheij, G. M. H. (2011, April). Analysis of failure causes of pipelines transporting dangerous substances. In: *6th Pipeline Technology Conference*. Hannover, Germany.
- Hassan, F., & Iqbal, J. (2006). Consequential rupture of gas pipeline. *Engineering Failure Analysis*, 12, 127–135.
- Hassan, F., & Ahmed, F. (2007). Metallurgical analysis of high pressure gas pipelines rupture. *Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1, 14–23.
- Hauer, E., & Hakkert, A. S. (1988). Extent and some implications of incomplete accident reporting. *Transportation Research Record*, 1185, 1–10.
- Hemmatian, B., Abdolhamidzadeh, B., Darbra, R. M., & Casal, J. (2014). The significance of domino effect in chemical accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 29, 30–38.
- Hemmatian, B., Planas, E., & Casal, J. (2015). Fire as a primary event of accident domino sequences: The case of BLEVE. *Reliability Engineering & System Safety*, 139, 141–148.
- Henselwood, F., & Phillips, G. (2006). A matrix-based risk assessment approach for addressing linear hazards such as pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19 (5), 433–441.
- HIInt Dossier. (2005). *Gas Pipeline Explosion at Ghislenghien, Belgium*. En www.iab-atex.nl (Fecha de acceso: Julio 1, 2015).
- Holsapple, K. A. (1980). The equivalent depth of burst for impact cratering. *Lunar and Planetary Science Conference* (vol. 11), 2379–2401, Houston, TX.

- Howell, J. R., Mengüç, M. P., & Siegel, R. (2010). *Thermal radiation heat transfer* (6th Ed.). Florida: CRC press.
- HSE (Health and Safety Executive). (2000). *Contract Research Report 294/2000: Report on a study of international pipeline accidents*. Liverpool, U.K.
- HSE (Health and Safety Executive). (2002). *Research Report 036, Report on a second study of pipeline accidents using the Health and Safety Executive's risk assessment programs MISHAP and PIPERS*. Liverpool U.K.
- IGEM (Institution of Gas Engineers and Managers). (2012). *Assessing the risks from high pressure Natural Gas pipelines* (2nd Ed.). IGEM House. Kegworth, U.K.
- INGAA (Interstate Natural Gas Association of America). (2013). *Building interstate natural gas Transmission Pipelines: A primer*. INGAA Foundation Report 2013.01. Washington, D.C.
- Jo, Y. D., & Ahn, B. J. (2005). A method of quantitative risk assessment for transmission pipeline carrying natural gas. *Journal of hazardous materials*, 123, 1–12.
- Joshi, P., Bikkina, P., & Wang, Q. (2016). Consequence analysis of accidental release of supercritical carbon dioxide from high pressure pipelines. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 55, 166–176.
- Khan, F. I., & Abbasi, S. A. (1998). DOMIFFECT (DOMIno eFFECT): user-friendly software for domino effect analysis. *Environmental modelling & software*, 13 (2), 163–177.
- Kozanoglu, B., Zárate, L., Gómez-Mares, M., & Casal, J. (2011). Convective heat transfer around vertical jet fires: An experimental study. *Journal of Hazardous Materials*, 197, 104–108.
- Kraus, J. (2014). A critical evaluation of risk assessment methodology for natural gas pipeline. *Reliability and Safety: Methodology and Applications*, CRC Press, 43–47.
- Lees, F. (2005). *Lees' loss prevention in the process industries*. In Mannan, S. (3^a Ed.). Butterworth-Heinemann, Oxford, U.K.
- Llamas-Moya, B. (2009). *Captura y Almacenamiento de CO₂: Criterios y metodología para evaluar la idoneidad de una estructura geológica*

Referencias

- como almacén de CO₂ (vol. 20). Servicio de Publicaciones de la Universidad de Huelva, Huelva.
- Lowesmith, B. J., Hankinson, G., Acton, M. R., & Chamberlain, G. (2007). An overview of the nature of hydrocarbon jet fire hazards in the oil and gas industry and a simplified approach to assessing the hazards. *Process Safety and Environmental Protection*, 85 (3), 207–220.
- Luccioni, B., Ambrosini, D., Nurick, G., & Snyman, I. (2009). Craters produced by underground explosions. *Computers & Structures*, 87 (21–22), 1366–1373.
- Mader, C. L. (2009). Numerical modeling of crater formation by meteorite impact and nuclear explosion. *Predictive Modeling of Dynamic Processes*, 447–457.
- Majid, Z. A., Mohsin, R., & Omar, F. (2008). Erosive wear of natural gas pipeline. *Jurnal Teknologi*, 49F, 341–356.
- Majid, Z. A., Mohsin, R., Yaacob, Z., & Hassan, Z. (2010). Failure analysis of natural gas pipes. *Engineering Failure Analysis*, 17, 818–837.
- Majid, Z. A., Mohsin, R., & Yusof, M. Z. (2011a). Erosive wear of natural gas pipes due to high velocity jet impact: physical examination and experimental study. *Jurnal Teknologi*, 56, 1–25.
- Majid, Z. A., Mohsin, R., & Yusof, M. Z. (2011b). Erosive wear of natural gas pipes due to high velocity jet impact: computer simulation study. *Jurnal Teknologi*, 56, 27–52.
- Majid, Z. A., & Mohsin, R. (2012). Failure investigation of natural gas pipeline. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 37 (4), 1083–1088.
- Majid, Z. A., Mohsin, R., & Yusof, M. Z. (2012). Experimental and computational failure analysis of natural gas pipe. *Engineering Failure Analysis*, 19, 32–42.
- Majid, Z. A., & Mohsin, R. (2013). Multiple failures of API 5L X42 natural gas pipeline. *Engineering Failure Analysis*, 31, 421–429.
- Mazzola, A. (1999). Thermal interaction analysis in pipeline systems: A case study. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 12 (6), 495–505.
- Menon, E. (2011a). Chapter 12: Compressor Stations. In Menon (Ed.), *Pipeline Planning and Construction Field Manual* (p. 259–291). Amsterdam, Netherlands: Elsevier.

- Menon, E. (2011b). Chapter 13: Corrosion Protection. In Menon (Ed.), *Pipeline Planning and Construction Field Manual* (p. 293–304). Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
- MHIDAS (Major Hazardous Incident Data Service). (2007). In AEA technology. London: HSE-Health and Safety Executive. United Kingdom.
- MIFACE (Michigan Fatality Assessment and Control Evaluation). (2007). Apprentice Lineman Dies When the Vibratory Plow He was Operating Struck a High Pressure Natural Gas Line. *Fatality Investigation Report #06MI207*. Occupational & Environmental Medicine, Michigan State University. Michigan.
- Mishra, K. B., & Klaus-Dieter, W. (2015). Underground gas pipeline explosion and fire: CFD based assessment of foreseeability. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 24, 526–542.
- Mohsin, R., Majid, Z. A., & Yusof, M. Z. (2013). Multiple failures of API 5L X42 natural gas pipe: Experimental and computational analysis. *Engineering Failure Analysis*, 34, 10–23.
- Mohsin, R., Majid, Z. A., & Yusof, M. Z. (2014). Safety distance between underground natural gas and water pipeline facilities. *Reliability Engineering & System Safety*, 131, 53–60.
- Mohsin, R., Majid, Z. A., & Tan, F. L. (2015). Numerical analysis of wall shear patterns on the external wall of an API 5L X42 natural gas pipe. *Engineering Failure Analysis*, 48, 30–40.
- Mokhatab, S., Poe, W., and Mak, J. (2015). *Handbook of Natural Gas Transmission and Processing: Principals and Practices* (3rd Ed.). Amsterdam, Netherlands: Gulf Professional Publishing.
- Moosemiller, M. (2011). Development of algorithms for predicting ignition probabilities and explosion frequencies. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24 (3), 259–265.
- NewsOn6. (2013). No Injuries In Pipeline Explosion, Fire In Pittsburg County. En *News On 6 Oklahoma's Own* www.newson6.com (Fecha de acceso: Enero 21, 2016).
- Nordyke, M. D. (1977). Nuclear cratering experiments – United States and Soviet Union. In *Impact and Explosion Cratering: Planetary and Terrestrial Implications*, 103–124.

Referencias

- NTSB (National Transportation Safety Board). (1982). Pacific Gas & Electric Company Natural Gas Pipeline Puncture, San Francisco, California, August 25, 1981. *Pipeline Accident Report NTSB/PAR-82/01*. Washington, D.C.
- NTSB (National Transportation Safety Board). (1990). Explosion and fire, Allentown, Pennsylvania, August 29, 1990. *Pipeline Accident Brief DCA-90-FP-001*. Washington, D.C.
- NTSB (National Transportation Safety Board). (2001). Natural Gas Explosion and Fire, Loudoun County, Virginia, July 7, 1998. *Pipeline Accident Report NTSB/PAR-01-01*. Washington, D.C.
- NTSB (National Transportation Safety Board). (2003). Natural Gas Pipeline Rupture and Fire Near Carlsbad, New Mexico, August 19, 2000. *Pipeline Accident Report NTSB/PAR-03/01*. Washington, D.C.
- NTSB (National Transportation Safety Board). (2011). Natural Gas Transmission Pipeline Rupture and Fire, San Bruno, California, September 9, 2010. *Pipeline Accident Report NTSB/PAR-11/01*. Washington, D.C.
- NTSB (National Transportation Safety Board). (2012). Hazardous Liquid Pipeline Rupture and Release, Marshall, Michigan, July 25, 2010. *Pipeline Accident Report NTSB/PAR-12/01*. Washington, D.C.
- NTSB (National Transportation Safety Board). (2013a). Pipeline damage with release, Romeoville, Illinois, September 9, 2010. *Pipeline Accident Brief DCA-10-FP-009*. Washington, D.C.
- NTSB (National Transportation Safety Board). (2013b). Rupture of Florida Gas Transmission Pipeline and Release of Natural Gas, Near Palm City Florida, May 4, 2009. *Pipeline Accident Brief NTSB/PAB-13/01*. Washington, D.C.
- NTSB (National Transportation Safety Board). (2014a). *Pipeline Accident Reports*. En www.nts.gov (Fecha de acceso: Noviembre 6, 2014). Washington, D.C.
- NTSB (National Transportation Safety Board). (2014b). Columbia Gas Transmission Corporation Pipeline Rupture, Sissonville, West Virginia, December 11, 2012. *Pipeline Accident Report NTSB/PAR-14/01*. Washington, D.C.

- Orphal, D. L. (1977). Calculations of explosion cratering. I-The shallow-buried nuclear detonation JOHNIE BOY. In *Impact and Explosion Cratering: Planetary and Terrestrial Implications*, 897–906.
- OSHA (Occupational Safety and Health Administration). (2003). Safety and Health Regulations for Construction: Soil Classification. *29 Code of Federal Regulation, Part 1926, Subpart P, App A*. Department of Labor. Washington, D.C.
- OSHA (Occupational Safety and Health Administration). (2015). *Trenching and Excavation Safety* (OSHA 2226-10R). Department of Labor. Washington, D.C.
- Ozzane, H. (2011a). Chapter 6: Overview of Pipeline Materials. In Menon (Ed.), *Pipeline Planning and Construction Field Manual* (p. 93–103). Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
- Ozzane, H. (2011b). Chapter 14: Leak Detection. In Menon (Ed.), *Pipeline Planning and Construction Field Manual* (p. 305–318). Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
- Ozzane, H. (2011c). Chapter 2: Route Selection. In Menon (Ed.), *Pipeline Planning and Construction Field Manual* (p. 43–56). Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
- Ozzane, H. (2011d). Chapter 19: Commissioning. In Menon (Ed.), *Pipeline Planning and Construction Field Manual* (p. 405–420). Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
- Palacios, A., Muñoz, M., & Casal, J. (2009). Jet fires: an experimental study of the main geometrical features of the flame in subsonic and sonic regimes. *AIChE Journal*, 55, 256–263.
- Palacios, A., & Casal, J. (2011). Assessment of the shape of vertical jet fires. *Fuel*, 90 (2), 824–833.
- Peekema, R. M. (2013). Causes of natural gas pipeline explosive ruptures. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 4 (1), 74–80.
- Pharris, T. C., & Kolpa, R. L. (2007). *Overview of the design, construction, and operation of interstate liquid petroleum pipelines* (No. ANL/EVS/TM/08-1). Argonne National Laboratory (ANL). Illinois.
- PHMSA (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration). (1970). *Gas Pipeline Minimum Federal Safety Standards General Construction Requirements* (35 FR 3237). Office of Pipeline Safety. Washington, D.C.

Referencias

- PHMSA (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration). (2008). *Corrective Action Order CPF No. 1-2008-1004H*. Washington, D.C.
- PHMSA (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration). (2009). *Corrective Action Order CPF No. 4-2009-1021H*. Washington, D.C.
- PHMSA (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration). (2011a). *Pipeline Replacement Updates - Call to Action*. En <https://primis.phmsa.dot.gov> (Fecha de acceso: Febrero 22, 2016). Washington, D.C.
- PHMSA (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration). (2011b). *Tennessee Gas Pipeline Co. – Wrinkle Bend Failure, Natchitoches Parish, LA*. November 30, 2010. Failure Investigation Report. Washington, D.C.
- PHMSA (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration). (2011c). *Tennessee Gas Pipeline Co. – Internal Corrosion, East Bernard, Texas*. December 8, 2010. Failure Investigation Report. Washington, D.C.
- PHMSA (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration). (2011d). *Corrective Action Order CPF No. 3-2011-1018H*. Washington, D.C.
- PHMSA (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration). (2011e). *Corrective Action Order CPF No. 2-2011-1011H*. Washington, D.C.
- PHMSA (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration). (2012a). *Southern Star Central Rupture, Overpressure in KS*. June 30, 2005. Failure Investigation Report. Washington, D.C.
- PHMSA (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration). (2012b). *TransCanada/Bison Pipeline Natural Gas Transmission Release near Gillette, WY*. July 20, 2011. Failure Investigation Report. Washington, D.C.
- PHMSA (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration). (2012c). *Corrective Action Order CPF No. 4-2012-1011H*. Washington, D.C.
- PHMSA (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration). (2013a). *Tennessee Gas Pipeline Line 100-1, Batesville, Mississippi*. November 21, 2011. Failure Investigation Report. Washington, D.C.
- PHMSA (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration). (2013b). *Corrective Action Order CPF No. 4-2013-1016H*. Washington, D.C.

- PHMSA (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration). (2014a). *Pipeline Failure Investigation Reports*. En www.phmsa.dot.gov (Fecha de acceso: Septiembre 22, 2014). Washington, D.C.
- PHMSA (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration). (2014b). *All Reported Pipeline Incidents*. En <http://primis.phmsa.dot.gov> (Fecha de acceso: Febrero 10, 2015). Washington, D.C.
- PHMSA (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration). (2014c). *Corrective Action Order CPF No. 2-2014-1001H*. Washington, D.C.
- PHMSA (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration). (2014d). *Notice of Proposed Safety Order CPF No. 3-2014-1008S*. Washington, D.C.
- PHMSA (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration). (2015a). *Notice of Proposed Safety Order CPF No. 2-2015-1001S*. Washington, D.C.
- PHMSA (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration). (2015b). *Corrective Action Order CPF No. 4-2015-1009H*. Washington, D.C.
- PHMSA (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration). (2016a). *Incident Report Criteria History*. En www.phmsa.dot.gov (Fecha de acceso: Abril 19, 2016). Washington, D.C.
- PHMSA (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration). (2016b). *Reporting Criteria Changes – 1990-Current*. En www.phmsa.dot.gov (Fecha de acceso: Abril 19, 2016). Washington, D.C.
- PHMSA (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration). (2016c). *Hazardous Liquid Accident Data – January 2002 to December 2009*. En www.phmsa.dot.gov (Fecha de acceso: Marzo 30, 2016). Washington, D.C.
- PHMSA (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration). (2016d). *Natural Gas Pipelines*. En <https://primis.phmsa.dot.gov> (Fecha de acceso: Febrero 22, 2016). Washington, D.C.
- Piccinini, R., Tommasini, R., & Pons, E. (2009). Large N. G. explosion and fire involving several buried utility networks. *Process Safety and Environmental Protection*, 87 (2), 73–80.
- Ramírez-Camacho, J. G., Pastor, E., Casal, J., Amaya-Gómez, R., & Muñoz-Giraldo, F. (2015). Analysis of domino effect in pipelines. *Journal of Hazardous Materials*, 298, 210–220.

Referencias

- Ramírez-Camacho, J. G., Carbone, F., Pastor, E., Bubbico, R., & Casal, J. (2016). Assessing the consequences of pipeline accidents to support land-use planning. *Safety Science*, 97, 34–42.
- Reniers, G. (2010). An external domino effects investment approach to improve cross-plant safety within chemical clusters. *Journal of Hazardous Materials*, 177 (1), 167–174.
- Reniers, G., & Cozzani, V. (2013). Chapter 3: Features of escalation scenarios. In Reniers & Cozzani (Eds.) *Domino Effects in the Process Industries, Modelling, Prevention and Managing* (p. 30–42). Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
- Rew, P. J., Spencer, H., & Daycock, J. (2000). Off-site ignition probability of flammable gases. *Journal of hazardous materials*, 71 (1), 409–422.
- RIVM (National Institute of Public Health and the Environment). (2009). *Reference Manual Bevi Risk Assessment version 3.2*. Netherlands.
- Rodríguez, A. (2011). *Sistemas SCADA* (2ª Ed.). Barcelona, España: Ediciones Marcombo.
- Ronza, A., Vílchez, J. A., & Casal, J. (2007). Using transportation accident databases to investigate ignition and explosion probabilities of flammable spills. *Journal of Hazardous Materials*, 146 (1), 106–123.
- Siler-Evans, K., Hanson, A., Sunday, C., Leonard, N., & Tumminello, M. (2014). Analysis of pipeline accidents in the United States from 1968 to 2009. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 7 (4), 257–269.
- Silva, E. P., Nele, M., Frutuoso e Melo, P. F., & Könözsy, L. (2016). Underground parallel pipelines domino effect: An analysis based on pipeline crater models and historical accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 43, 315–331.
- Speight, J. G. (2007). *Natural Gas: A Basic Handbook*. Houston, Texas: Gulf Publishing Company.
- Spoelstra, M. B., & Laheij, G. M. H. (2011). Towards a method to calculate risks of underground pipelines transporting hazardous substances. In *Hazards XXII, Symposium Series*, (156), 254–260. Liverpool, U.K.
- St. Joseph Gazette. (1961). Wave of fright follows gas pipeline explosion. En *Google News Archive Search* www.news.google.com (Fecha de acceso: Julio 6, 2015).

- Star-News. (1974). Gas blast disrupts service. En *Google News Archive Search* www.news.google.com (Fecha de acceso: Enero 25, 2016).
- Stewart, M. (2016). *Surface Production Operations: Facility Piping and pipeline systems* (vol. 3). Massachusetts, U.S.: Gulf Professional Publishing.
- Storch, J. M., y García T. (2008). *Seguridad industrial en plantas químicas y energéticas. Fundamentos, evaluación de riesgo y diseño* (2ª Ed.). Barcelona, España: Díaz de Santos.
- The Gazette. (2014). Excavators agree to maximum civil penalty in natural gas line accidents. En *The Gazette's daily news* www.thegazette.com (Fecha de acceso: Diciembre 3, 2015).
- The Intelligencer. (2014). Two Natural Gas Pipelines in Marshall County Rupture in Less Than Three Hours. En *The Wheeling Intelligencer* www.theintelligencer.net (Fecha de acceso: Enero 21, 2016).
- The People's Tribune. (2015). *Pipeline Ruptures near Pike 43*. En www.thepeopletribune.com (Fecha de acceso: Enero 26, 2016).
- Toledo Blade. (1954). Gas pipeline blast in County Digs 10-foot-deep crater in Cornfield. En *Google News Archive Search* www.news.google.com (Fecha de acceso: Julio 6, 2015).
- Tonelli, S. M., & Aparício, L. V. (2005, August). Consequence evaluation in buried natural gas pipeline. In *4th Mercosur Congress on Process Systems Engineering and 2nd Mercosur Congress on Chemical Engineering*. Rio Das Pedras, Brazil.
- TRB (U.S. Transportation Research Board). (2004). *Transmission pipelines and land use: A risk-informed approach* (vol. 281). Washington, D.C.
- Trépanier, M., Leroux, M. H., & de Marcellis-Warin, N. (2009). Cross-analysis of hazmat road accidents using multiple databases. *Accident Analysis & Prevention*, 41 (6), 1192–1198.
- TSB (Transportation Safety Board of Canada). (1997). Natural Gas Pipeline Ruptures, Transcanada Pipelines Limited Line 100-3, 914-milimetre (36-inch) Main Line Kilometre Post Main Line Valve 30-3 + 0.245 kilometres Line 100-4, 1,067-milimetre (42-inch) Main Line Kilometre Post Main Line Valve 30-4 + 0.220 kilometres Rapid City, Manitoba, 29 July 1995. *Commodity Pipeline Occurrence Report P95H0036*. Canada.
- TSB (Transportation Safety Board). (2009). Natural gas pipeline rupture TransCanada Pipeline Inc. 914-Millimeter-Diameter Pipeline Line 2 –

Referencias

- MLV 107-2 + 6.031 KM Near Englehart, Ontario, 12 September 2009. *Pipeline Investigation Report P09H0074*. Canada.
- TSB (Transportation Safety Board). (2011). TransCanada PipeLines Limited 914.4 -Millimetre-Diameter Pipeline Line 100-2 – MLV 76-2 + 09.76 KM, Beardmore, Ontario, 19 February 2011. *Pipeline Investigation Report P11H0011*. Canada.
- TSB (Transportation Safety Board). (2013a). Westcoast Energy Inc., carrying on business as Spectra Energy Transmission Nig Creek Pipeline, Kilometre Post 1.93 near Buick, British Columbia, 28 June 2012. *Pipeline Investigation Report P12H0105*. Canada.
- TSB (Transportation Safety Board). (2013b). TransCanada PipeLines Limited (NOVA Gas Transmission Ltd.) North Central Corridor Loop (Buffalo Creek West Section) Chainage 27+996 m near Fort McMurray, Alberta, 17 October 2013. *Pipeline Investigation Report P13H0107*. Canada.
- TSB (Transportation Safety Board). (2014a). *Pipeline investigation reports*. En www.tsb.gc.ca (Fecha de acceso: Septiembre 24, 2014). Canadá.
- TSB (Transportation Safety Board). (2014b). *Statistical Summary Pipeline Occurrences 2013*. En www.tsb.gc.ca (Fecha de acceso: Enero 24, 2015). Canadá.
- TSB (Transportation Safety Board). (2014c). Natural gas pipeline rupture TransCanada Pipe Lines Limited Line 400-1 at Mainline Valve Site 402 near Otterburne, Manitoba, 25 January 2014. *Pipeline Investigation Report P14H0011*. Canada.
- Vílchez, J. A., Sevilla, S., Montiel, H., & Casal, J. (1995). Historical analysis of accidents in chemical plants and in the transportation of hazardous materials. *Journal of Loss Prevention in the process Industries*, 8 (2), 87–96.
- Wang, X., & Economides, M. (2009). *Advanced Natural gas Engineering*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
- Wang, Z., Fu, Z., Zou, Y., Liu, L., & Liu. H. (2011). Study on risk assessment of urban gas pipeline based on domino effect. *International Conference on Pipelines and Trenchless Technology*, 1720–1727. Beijing, China.
- Wang, H., & Duncan, I. J. (2014). Likelihood, causes, and consequences of focused leakage and rupture of US natural gas transmission pipelines. *Journal of loss prevention in the process industries*, 30, 177–187.

- Wijewickreme, D., & Weerasekara, L. (2011). Pipeline Geotechnical Engineering. *Environmental and Engineering Geology* (vol. II). EOLSS Publishers/ UNESCO. United Kingdom.
- Wininger, G. (2011). Chapter 16: Pipeline Construction. In Menon (Ed.), *Pipeline Planning and Construction Field Manual* (p. 341–355). Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
- Xin-zhe, N., Dong-jin, Y., Hong-fei, Z., Yi-hao, C., & Hao-zhou, W. (2013). Investigation in craters formed by explosives with different burial depth in soil. *Journal of Engineering*, 1 (3), 2325–0224.
- Yafimava, K. (2015). Evolution of gas pipeline regulation in Russia: Third party access, capacity allocation and transportation tariffs. *Oxford Institute For Energy Studies*, NG 95.
- Yang, J., Li, F., Zhou, J., Zhang, L., Huang, L., & Bi, J. (2010). A survey on hazardous materials accidents during road transport in China from 2000 to 2008. *Journal of Hazardous materials*, 184, 647–653.

PUBLICACIÓN DE LOS RESULTADOS PRESENTADOS EN EL CAPÍTULO 2
POR LA REVISTA «SAFETY SCIENCE».

Safety Science 97 (2017) 34–42



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Safety Science

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ssci



Special Issue Article: Risk and land-use

Assessing the consequences of pipeline accidents to support land-use
planning



J. Giovanni Ramírez-Camacho^a, Federica Carbone^b, Elsa Pastor^{a,*}, Roberto Bubbico^b, Joaquim Casal^a

^a Centre for Technological Risk Studies (CERTEC), Department of Chemical Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya – BarcelonaTech (UPC), Diagonal 647, 08028 Barcelona, Catalonia, Spain

^b Dipartimento di Ingegneria Chimica, Materiali, Ambiente, Università di Roma “La Sapienza”, 00184 Roma, Italy

ARTICLE INFO

Article history:

Received 28 May 2015

Received in revised form 8 January 2016

Accepted 22 January 2016

Available online 17 February 2016

Keywords:

Pipelines

Transport

Accidents

Failure causes/consequences

Hazardous materials

Oil/gas

ABSTRACT

With the rapid development of industry, the number of pipelines that are proposed or under construction is increasing year by year, connecting different regions of a country and, more and more, different countries. Thus, an accidental loss of containment from a pipeline involves a certain risk, which could imply potential consequences on people, equipment and environment. Therefore, the existence in some places of a large net of pipelines has a clear influence on land-use planning, especially in the ones with intense activities, which usually are the inhabited zones. In this paper, a historical analysis is performed on a sample of 1063 accidents that occurred in onshore pipelines, to illustrate the risk associated to these systems and its significance in land-use planning.

© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

The characteristics of the present highly complex and interconnected societies require a continuous flow of materials and energy from one geographical area to another. In particular huge amounts of often hazardous materials, mainly liquids or gases, are transported from production/extraction sites, through processing plants, to the final consumption areas.

The transportation can be performed by different modes: road, rail, ship (sea/river) or pipeline. Most of these modes have a strong interaction with the landscape, as often the transport takes place over long distances, crossing both rural and urban areas.

One of the most used modes in the case of fluids is the transport through pipelines, which is usually considered one of the safest among the aforementioned ones, as discussed in Section 2. Nevertheless, most of the transported fluids are flammable or toxic. Thus, an accidental loss of containment from a pipeline involves a certain risk, which could imply potential consequences on people, equipment and environment. These consequences will depend on the amount and properties of the released material, and on the features of the affected zone (rural or urban). Taking into account the large length of pipelines in many countries, with the consequent

interaction with the land, and the huge amount of materials transported every day, the occurrence of an accident cannot be neglected. In fact, accidents or incidents following the release from a pipeline have actually occurred with a certain frequency, and some of them with severe consequences.

In some places, the existence of a large net of pipelines has therefore a clear influence on land-use planning, especially in the zones with intense industrial activities, which usually are also the most inhabited ones. Concerning this scenario, two possible situations can be found: (a) the existence of a pipeline in a zone initially not inhabited, which becomes urban later on, and (b) the existence of a pipeline in an already existing urban zone. In both cases, the risk inherent to a possible loss of containment increases as compared to that in a rural zone, due to the activities associated to the human presence. However, even in uninhabited regions an accident can have serious consequences on the environment, polluting soil or water or damaging areas of special ecological interest.

These are complex situations. Land-use planning aims to protecting human health and the environment through the definition of safety zones around the pipeline. It contributes also to reducing the risk of third part activities –especially excavation works– by applying different measures; these can include technical measures such as increasing pipe wall thickness or burial depth or marking the pipeline corridor, or organizational ones as, for example, ensuring that any excavation work will be communicated before starting (COWI, 2011).

* Corresponding author. Tel.: +34 93 4016675; fax: +34 93 4017150.
E-mail address: elsa.pastor@upc.edu (E. Pastor).

PUBLICACIÓN DE LOS RESULTADOS PRESENTADOS EN EL CAPÍTULO 3
 POR LA REVISTA «PROCESS SAFETY AND ENVIRONMENTAL
 PROTECTION».

PROCESS SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION 104 (2016) 95–110



Contents lists available at ScienceDirect

Process Safety and Environmental Protection



journal homepage: www.elsevier.com/locate/psep

Conditional probabilities of post-release events for
 hazardous materials pipelines



R. Bubbico^{a,*}, F. Carbone^a, J.G. Ramírez-Camacho^b, E. Pastor^b, J. Casal^b

^a Dipartimento di Ingegneria Chimica, Materiali e Ambiente, "Sapienza" Università di Roma, via Eudossiana 18, 00184 Roma, Italy

^b Centre for Technological Risk Studies (CERTEC), Department of Chemical Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya – BarcelonaTech (UPC), Diagonal 647, 08028 Barcelona, Catalonia, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 24 May 2016

Accepted 1 August 2016

Available online 31 August 2016

Keywords:

Pipelines

Transportation

Accidental release

Event trees

Probabilities

Hazardous materials

ABSTRACT

Pipelines are commonly considered a safe alternative for the transportation of hazardous materials. However, in case of failure, pipelines still pose major risks to the environment and to the population potentially exposed. The aim of the present work is to provide occurrence probabilities of the intermediate and final events following the accidental release of hazardous materials from pipelines. A collection of incidents and accidents occurred worldwide in connection with the use of onshore long-distance pipeline networks, has been gathered to make up a specific database for the analysis of incidents in pipelines. A qualitative and quantitative analysis of the data has allowed to develop detailed event trees for the different classes of hazardous materials, and to calculate the probability of occurrence of the final outcomes. The investigation has also aimed at identifying, for each type of release, the relationship between the final events and the causes of the pipeline failure. The results obtained represent a useful and needed starting point in Quantitative Risk Analysis of hazardous materials transportation via pipelines.

© 2016 Institution of Chemical Engineers. Published by Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Pipeline transportation is commonly regarded as a safer alternative compared to other transportation modes, such as road and rail, based on the low accident frequency and the generally limited number of fatalities historically registered (Papadakis, 1999). Nonetheless, due to the continually increasing extension of their network, pipelines often cross highly populated and industrialized areas, so that in case of a loss of containment involving a hazardous substance, significant damages can affect a large number of people. At the same time, given the close interaction between the pipeline and human activities, the frequency of occurrence of failures can become significant. When crossing rural areas, despite the low number of people possibly involved, environmental impact and pollution can result. As a matter of fact, a number of recent

accidents, such as the one occurred in Ghislenghien, Belgium, on July 30, 2004, where the rupture of a high pressure natural gas pipeline and the subsequent large fire caused 23 casualties and around 150 hospitalized (ARIA, 2009), or the one occurred in Marshall, Michigan (NTSB 2012), with an important pollution on a wetland and two rivers, confirm this concern.

Consequently, an increasing attention has been devoted in recent years to the quantification of the risk associated with this transportation mode based on the well-known techniques of Quantitative Risk Analysis (QRA) (Jo and Ahn, 2005; Dziubiński et al., 2006; Jo and Crowl, 2008; Casal, 2008; Han and Weng, 2010). This methodology consists in a stepwise procedure where the following main phases are carried out: identification of the accident scenarios, calculation of their consequences in terms of damaged areas and people involved, estimation of their frequency of occurrence and,

* Corresponding author.

E-mail address: roberto.bubbico@uniroma1.it (R. Bubbico).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2016.08.011>

0957-5820/© 2016 Institution of Chemical Engineers. Published by Elsevier B.V. All rights reserved.

PUBLICACIÓN DE LOS RESULTADOS PRESENTADOS EN EL CAPÍTULO 5 POR LA REVISTA «JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS».

Journal of Hazardous Materials 298 (2015) 210–220



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Hazardous Materials

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jhazmat



Analysis of domino effect in pipelines



J. Giovanni Ramírez-Camacho^a, Elsa Pastor^{a,*}, Joaquim Casal^a, Rafael Amaya-Gómez^b,
Felipe Muñoz-Giraldo^b

^aCentre for Technological Risk Studies (CERTEC), Department of Chemical Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya, Diagonal 647,
08028-Barcelona, Catalonia, Spain

^bDepartment of Chemical Engineering, Universidad de los Andes, Carrera 1 No. 18A-10, Bogotá, Colombia

HIGHLIGHTS

- In parallel pipelines domino effect can have a significant influence.
- Domino effect will be originated by jet erosion or jet fire impingement.
- The domino effect probability depends on the geometric arrangement of the system.
- A mathematical model has been developed to estimate domino effect probability.
- This probability allows a more realistic estimation of failure frequencies.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 20 February 2015

Received in revised form 14 May 2015

Accepted 18 May 2015

Available online 21 May 2015

Keywords:

Jet impingement

Jet fire

Pipe erosion

Impingement modeling

ABSTRACT

Parallel pipelines are frequently installed over long distances, due to the difficulty in creating or maintaining the required corridor. This implies that a release in one pipeline can seriously affect another one. The main risks associated with this domino effect are erosion by fluid–sand jets and the thermal action of jet fires. In this paper a survey has been performed on the accidents that have occurred, and the diverse associated domino sequences are analyzed. The probability of occurrence of domino effect is a function of the location of the hole, the jet direction and solid angle, the diameter of both pipelines and the distance between them. A mathematical model has been developed to estimate this probability. The model shows how the probability of domino effect decreases with the distance and diameter of the source pipe, and increases with the diameter of the target pipe. Its frequency can be estimated from this probability and from the frequency of the initiating pipe failure plus, in the case of jet fire impingement, the probability of ignition. The frequency of the target pipe failure thus calculated, always higher than its individual frequency, allows a more realistic risk analysis.

© 2015 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Pipelines are the most important and safe way to transport huge amounts of oil and other fluids to large distances, and to distribute them to the points where they are used. It is a relatively safe system; however, loss of containment events occur from time to time, due to bulldozers, corrosion, aging, landslides, etc. In such cases, a huge amount of flammable material can be released and this can lead to major accidents (i.e., explosions, fires, environmental pollution).

While most accidents have occurred because of the aforementioned causes, in some of them the severity of the event has been increased due to the so-called domino effect [1]. Domino effect can enlarge the scale of an accident and the severity of its consequences.

This can be especially important in industrial plants, due to the closeness of the diverse equipment units [2].

In the case of pipelines the situation is essentially different, as usually there are neither vessels nor other units in the near field. However, pipelines lay out over many kilometers crossing the country through forests, rivers and urban zones and, therefore, a hallway must be designed to allow this path. Such a hallway is often difficult to establish and it can be very expensive, and in many cases it is used for more than one pipe. Thus, parallel pipes, sometimes with a short separation between them, transporting gas, oil or water over long distances can be often found. The same situation exists in urban zones, where kilometers of pipes conveying gas, petrol or water are buried, together with other services such as electric wiring. Underground hallways in densely inhabited urban zones have sometimes a dense arrangement of parallel and crossing pipes and utilities, and this implies a certain risk associated to the potential interaction of these systems [3,4].

* Corresponding author. Tel.: +34 93 4016675; fax: +3493 4017150.
E-mail address: elsa.pastor@upc.edu (E. Pastor).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.05.033>
0304-3894/© 2015 Elsevier B.V. All rights reserved.

ESTRUCTURA DE LA BASE DE DATOS DESARROLLADA PARA EL REGISTRO DE LOS ACCIDENTES DE TUBERÍAS RECOPIADOS DE LA LITERATURA.

General	Específico	Campo	Descripción	Clave
Identificación del registro	Registro	No. de registro	Indica el número de registro del accidente en la base de datos	[Cadena numérica]
	Localización	Fecha del accidente	Fecha en que ocurrió el accidente	DD/MM/AAAA
		Lugar de ocurrencia	Define el lugar donde ocurrió el accidente	Ciudad/Estado/país
	Densidad de población	Indica el tipo de densidad de población de la zona donde ocurrió el accidente	Urbana, rural	
Desarrollo del accidente	Tipo de evento	Incidente general	Indica el tipo de evento general que tuvo lugar	Liberación, Nube de gas/vapor, Incendio, Explosión
		Incidente específico	Indica el tipo de evento específico ocurrido	<i>Liberación:</i> fuga, derrame, ruptura de paso total. <i>Nube de gas/vapor:</i> nube inflamable, nube tóxica. <i>Incendio:</i> Jet fire, Flash fire, Pool fire, Fireball. <i>Explosión:</i> Explosión de nube de gas/vapor.
	Causas	Causa general	Describe la o las causas generales del accidente	Actividad de terceros, Corrosión, Fallo mecánico, Error humano/operacional, Peligro natural, Fallo del equipo
		Causa específica	Describe la o las causas específicas del	<i>Actividades de terceros:</i> maquinaria de excavación,

Apéndice D

General	Específico	Campo	Descripción	Clave
			accidente	<p>vehículo/otro equipo no relacionado con actividad de excavación, tráfico fluvial, cargas pesadas, líneas de alta tensión.</p> <p><i>Corrosión:</i> externa, interna, corrosión bajo tensión.</p> <p><i>Fallo mecánico:</i> fallo de la soldadura, defecto del material, sobrepresión, defecto de construcción, envejecimiento, fallo en estructura de soporte.</p> <p><i>Error humano/operacional:</i> mantenimiento, reparación/reemplazo, puesta en marcha, operaciones generales, desmantelamiento, operación de la válvula, hot tapping, operación de pigging, prueba de presión, apagado.</p> <p><i>Peligros naturales:</i> deslizamiento de tierra, inundación, relámpagos, fuertes lluvias, clima frío, erosión.</p> <p><i>Fallo del equipo:</i> brida, válvula, bomba/compresor.</p> <p><i>Otros.</i></p>
	Características del sistema	<p>Parte involucrada del sistema</p> <p>Tipo de instalación</p> <p>Diámetro</p>	<p>Describe la parte del sistema donde ocurrió el accidente</p> <p>Describe el tipo de instalación de la tubería</p> <p>Describe el diámetro de la sección de la tubería donde ocurrió el</p>	<p>Tubería, Estación de bombeo, Estación de compresión</p> <p>Tubería aérea, Tubería enterrada, Interface aire/tierra [Cadena numérica, en pulgadas]</p>

General	Específico	Campo	Descripción	Clave
		Año de instalación	accidente Indica el año que se instaló la sección de la tubería afectada por el accidente	[Cadena numérica de cuatro dígitos]
		Presión de operación	Indica la presión de operación normal del sistema	[Cadena numérica, en bares de presión]
		Presión al momento del fallo	Indica la presión al momento del fallo de la sección de la tubería afectada	[Cadena numérica, en bares de presión]
	Materiales involucrados	1er material involucrado	Nombre del primer material involucrado en el accidente	[Cadena de texto]
		Tipo de material	Describe el estado físico del material	Gas, Líquido
		Cantidad de material liberado	Indica el volumen liberado del material	[Campo de texto, en m ³]
		Cantidad de material recuperado	Indica el volumen de material recuperado después del accidente	[Campo de texto, en m ³]
		Peligros del material	Indica las propiedades del material involucrado	Corrosivo, Explosivo, Inflamable, Tóxico
		2do material involucrado	Nombre del segundo material involucrado en el accidente	[Cadena de texto]
		Tipo de material	Describe el estado físico del material	Gas, Líquido
		Cantidad de material liberado	Indica el volumen liberado del material	[Campo de texto, en m ³]
		Peligros del material	Indica las propiedades del material involucrado	Corrosivo, Explosivo, Inflamable, Tóxico

Apéndice D

General	Específico	Campo	Descripción	Clave
		Otros materiales involucrados	Nombre de otros materiales involucrados	[Cadena de texto]
	Consecuencias	Muertos	Indica el número de fatalidades causadas por el accidente	[Cadena numérica]
		Heridos	Indica el número de personas heridas	[Cadena numérica]
		Evacuados	Indica el número de personas que tuvieron que ser evacuadas	[Cadena numérica]
		Daños ambientales	Indica el medio receptor del material o materiales liberados en el accidente	<i>Tierra:</i> suelo, subsuelo, diques, estanques de contención. <i>Agua:</i> ríos, pantanos, alcantarillado, humedales, lagos, corriente/riachuelo, estanques. <i>Aire:</i> Atmósfera.
		Otros daños	Indica otro tipo de daños (materiales) causados	[Cadena de texto]
		Daños económicos	Indica el monto total de las pérdidas económicas causadas por el accidente	[Cadena numérica, en dólares americanos]
Comentarios	Información complementaria del accidente	Resumen	Breve resumen de la secuencia del accidente	[Cadena de texto]
		Fuente de información	Indica la o las fuentes de donde se obtuvo la información del accidente	[Cadena mixta de texto y números]

ACCIDENTES QUE HAN INVOLUCRADO LA FORMACIÓN DE UN CRÁTER POR LA ROTURA DE UNA TUBERÍA ENTERRADA DE GAS NATURAL.

ID	Fecha Lugar	Diámetro (in) /Espesor (in) /Grado / Año de instalación / Tipo de tubería / Presión (bar) / Profundidad (m)	Dimensiones del cráter (m)				Longitud de la rotura (m)	Distancia a los fragmentos de la tubería (m)	Ignición	Longitud de las llamas (m)	Tiempo (min) hasta la ignición / al apagado del sistema	Causa de fallo	Heridos / Muertos / Evacuados	Referencias	
			Largo	Ancho	Profundidad	Área (m ²)									Volumen (m ³)
1	17/01/1954 Toledo, OH, EE.UU.	16 / - / - / - / T / 27,6 / -	18,3	2,4	3	34,5	276	-	-	No	Ninguna	- / 30	FM	0 / 0 / -	- Toledo Blade, 1954
2	18/06/1961 Laurel, MS, EE.UU.	36 / - / - / - / T / - / -	9,1	9,1	6,1	65	1058	-	183	Si	305	- / -	-	10 / 0 / -	- Evening Independent, 1961
3	19/11/1961 Warrenton, VA, EE.UU.	- / - / - / - / - / - / - -	12	3	1,8	28,3	135,7	12	137	Si	609	- / -	-	0 / 0 / -	- St. Joseph Gazette, 1961
4	04/03/1965 Natchitoches, LA, EE.UU.	24 / 0,25 / X46 / - / - / 54, 6 / 1	23	9	4,5	162,6	1951	8,2	107	Si	305-457	Inmediata / 45- 60	C	17 / 9 / -	- HSE, 2002; MHIDAS, 2007
5	22/02/1973 Austin, TX, USA	10,8 / 0,373 / - / - - / - / 36,9 / 1	3,05	3,05	-	7,3	-	-	No fragmentos	Si	Visible from 16 km	10-15 / 22	FM	2 / 6 / -	- HSE, 2002
6	02/01/1974 Prairie du Rocher, IL, EE.UU.	22 / - / - / - / T / - / -	18,3	-	4,6	-	-	-	-	Si	45	- / -	-	- / - / -	- Star-News, 1974
7	02/03/1974 Monroe, LA, EE.UU.	30 / 0,438 / X52 / - / T / 56 / 1,95	30	9,1	7,6	214,4	4345,5	12	-	Si	200	Inmediata / 85	FM	0 / 0 / 0	- HSE, 2002

Apéndice E

ID	Fecha Lugar	Diámetro (in) /Espesor (in) /Grado / Año de instalación / Tipo de tubería / Presión (bar) / Profundidad (m)	Dimensiones del cráter (m)				Longitud de la rotura (m)	Distancia a los fragmentos de la tubería (m)	Ignición	Longitud de las llamas (m)	Tiempo (min) hasta la ignición / al apagado del sistema	Causa de fallo	Heridos / Muertos / Evacuados	Referencias	
			Largo	Ancho	Profundidad	Área (m ²)									Volumen (m ³)
8	15/03/1974 Farmington, NM, EE.UU.	12 / 0,25 / - / - / T / 34,9 / 0,76	13	5,2	3	53	424,7	2,4	30	Si	100	8 / 75	C	0 / 3 / 0	- HSE, 2002
9	21/05/1974 Meridian, MS, EE.UU.	6,6 / 0,071 / - / - / 1970 / R / 21,1 / 0,9	3	3	1,8	7,1	34	-	No fragmentos	Si	100	20 / -	C	0 / 6 / -	- HSE, 2002; MHIDAS, 2007
10	09/06/1974 Bealeton, VA, EE.UU.	30 / 0,312 / X52 / - / T / 50,5 / 1	36	11	2,1	311	1741,7	17	91	Si	-	Inmediata / 55- 105	C	0 / 0 / 0	- HSE, 2002
11	09/08/1976 Cartwright, LA, EE.UU.	20 / 0,25 / - / - / 1949 / T / 54,1 / 0,6	13,7	7,6	3,05	81,8	665	-	-	Si	60	Inmediata / 40- 60	ATP	1 / 6 / -	- HSE, 2002
12	01/11/1978 Tabasco, Mexico	21 / - / - / - / D / - / -	91,4	-	6,1	-	-	-	-	Si	-	- / -	FM	11 / 52 / -	- MHIDAS, 2007
13	11/11/1979 West Monroe, LA, EE.UU.	20 / - / - / - / T / - / -	21,3	21,3	6,1	356,3	5796,3	-	-	No	Ninguno	Ninguno / -	-	0 / 0 / Si	- Daily Kent Stater, 1979
14	04/11/1982 Hudson, IA, EE.UU.	20 / 0,281 / X52 / - / T / 57,7 / 0,9	19,5	15	2,75	230	1684,7	19,2	13,7	Si	100	Inmediata / 65	ATP	0 / 5 / -	X BAM, 2009; HSE, 2002
15	25/03/1984 Eltersdorf, Germany	28 / 0,276 / DIN 2470 / - / T / 67,5 / 1	30	30	6	706,9	11309,7	10	-	Si	100	- / -	-	- / - / -	- HSE, 2000; MHIDAS, 2007
16	31/03/1984 Kouřim, Czech Republic	- / - / - / - / D / - / -	4,6	4,6	-	16,6	-	-	-	-	-	- / -	-	- / - / -	- MHIDAS, 2007
17	25/11/1984 Jackson, LA, EE.UU.	30 / 0,311 / X52 / 1955 / T / 71,4 / 0,9	27,5	7,6	3	164	1313,2	-	-	Si	100	Inmediata / Inmediata	ATP	23 / 5 / -	X HSE, 2002
18	10/03/1985	36 / 0,36 / - / - / -	27	10,6	3	225	1798,2	22,5	-	Si	-	- / -	-	- / - / -	- HSE, 2002;

Apéndice E

ID	Fecha Lugar	Diámetro (in) /Espesor (in) /Grado / Año de instalación / Tipo de tubería / Presión (bar) / Profundidad (m)	Dimensiones del cráter (m)				Longitud de la rotura (m)	Distancia a Ignición los fragmentos de la tubería (m)	Longitud de las llamas (m)	Tiempo (min) hasta la ignición / al apagado del sistema	Causa de fallo	Heridos / Muertos / Evacuados	Reporte	Referencias	
			Largo	Ancho	Profundidad	Área (m ²)									Volumen (m ³)
	Ignace, ON, Canada	/ 66,5 / -												BAM, 2009	
19	27/04/1985 Beaumont, KY, EE.UU.	30 / 0,469 / X65 / 1952 / T / 69,7 / 1,8	27,5	11,6	3,7	250,5	2472	9	-	Si	-	Inmediata / 146	C	3 / 5 / -	X HSE, 2000
20	20/08/1985 Lowther, ON, Canada	36 / 0,36 / - / - / - / 67,9 / -	28	-	4,9	-	-	9,4	320	Si	-	- / Inmediata	C	- / - / -	- HSE, 2002
21	21/02/1986 Lancaster, KY, EE.UU.	30 / 0,375 / X52 / 1957 / T / 69,4 / 1,8	152	9,1	1,8	1086	5214,5	146	-	Si	-	Inmediata / 41	C	8 / 0 / 77	X HSE, 2000
22	02/03/1986 Callander, ON, Canada	36 / 0,36 / - / - / - / 62,6 / -	31	-	4	-	-	31	185	No	Ninguna	Ninguno / -	-	- / - / -	- HSE, 2002
23	06/06/1990 Marionville, ON, Canada	12,7 / 0,252 / 5LX / 1957 / - / 47 / 1,2	4,6	1,5	1,7	5,4	24,6	-	No	No	Ninguna	Ninguno / 165	ATP	0 / 0 / Si	- HSE, 2002
24	15/01/1991 Cochrane, ON, Canada	30 / 0,36 / - / - / - / 63,1 / -	49	33	7	1270	23706,5	25,5	-	No	Ninguna	Ninguno / 8	C	- / - / -	- HSE, 2002
25	08/12/1991 Cardinal, ON, Canada	20 / 0,252 / - / - / - / 63,4 / -	17,8	9	2,7	126	906	25,7	20	No	Ninguna	Ninguno / 35	C	- / - / -	- HSE, 2002
26	15/07/1992 Potter, ON, Canada	36 / 0,36 / Polietileno / 1973 / T / 69 / 0,9	56,1	13,6	4,5	599	7190,7	46,8	250	Si	Visible a 100 km	- / -	C	- / - / -	- HSE, 2002; MHIDAS, 2007
27	22/12/1993 Moffat, Scotland	36 / 0,752 / - / - / - T / 48 / 3	10	10	4	78,5	837,8	-	-	No	Ninguna	Ninguno / -	FM	0 / 0 / Si	- MHIDAS, 2007; BAM, 2009
28	05/02/1994	24 / - / - / - / - / -	200	-	7	-	-	-	-	Si	-	- / -	EHO	30 / 8 / 500	- MHIDAS,

Apéndice E

ID	Fecha Lugar	Diámetro (in) /Espesor (in) /Grado / Año de instalación / Tipo de tubería / Presión (bar) / Profundidad (m)	Dimensiones del cráter (m)				Longitud de la rotura (m)	Distancia a los fragmentos de la tubería (m)	Ignición	Longitud de las llamas (m)	Tiempo (min) hasta la ignición / al apagado del sistema	Causa de fallo	Heridos / Muertos / Evacuados	Referencias	
			Largo	Ancho	Profundidad	Área (m ²)									Volumen (m ³)
	Cunduacán, Tabasco, Mexico	/ -											2007		
29	15/02/1994 Maple Creek, SK, Canada	42 / 0,427 / X70 / 1982 / T / 83,2 / 1,5	22	-	-	-	-	21,9	125	Si	125	Inmediata / 120	FM	0 / 0 / 0	X HSE, 2000
30	23/03/1994 Edison, NJ, EE.UU.	36 / 0,675 / X52 / 1960s / T / 68,2 / 3,7	43	20	4,3	675,4	7745	23	>244	Si	120-155	Inmediata / 150	ATP	112 / 0 / 1500 familias	X HSE, 2000
31	23/07/1994 Latchford, ON, Canada	36 / 0,36 / X65 / 1972 / - / 69 / 0,9	36	16	4	452,4	4825,5	21,8	-	Si	-	- / 4-38	C	0 / 0 / 0	X HSE, 2000
32	12/07/1995 Ukhta, Russia	56 / - / - / - / T / - / -	15,3	15,3	4,9	184	2402,4	-	-	Si	3000	- / -	-	- / 12 / -	- MHIDAS, 2007
33	29/07/1995 Rapid City, MB, Canada	42 / 0,371 / X65 / 1973 / - / 60,7 / 4	51	23	5	921,3	12283,6	10,5	90	Si	-	Inmediata / 22	C	1 / 0 / -	X TSB, 1997
34	15/04/1996 St. Norbert, MB, Canada	34 / 0,5 / 5LX / 1965 / D / 50 / 1,3	17	13,5	5	180,2	2403,3	6,3	40	Si	-	14 / 44	FM	0 / 0 / 1 familia	X HSE, 2000
35	12/07/1996 Sermenevo, Bashkortostan, Russia	- / - / - / - / - / - / -	8	8	2	50,3	268	-	-	Si	-	- / -	-	0 / 2 / 0	- MHIDAS, 2007
36	19/08/2000 Carlsbad, NM, EE.UU.	30 / 0,335 / X52 / 1975 / T / 47 / 2,1	34,4	15,5	6	419	6700,4	14,9	87,5	Si	150	Inmediata / Inmediata	C	0 / 12 / 0	X NTSB, 2003
37	07/12/2000 Jal, NM, EE.UU.	16 / - / - / - / - / - / / 1	8	7	3	44	352	-	-	Si	-	Inmediata / -	-	0 / 0 / -	- HInt Dossier, 2005
38	02/02/2001	- / - / - / - / - / - /	38	20	10	597	15917,4	28	-	No	Ninguno	- / -	-	- / - / -	- MHIDAS,

Apéndice E

ID	Fecha Lugar	Diámetro (in) /Espesor (in) /Grado / Año de instalación / Tipo de tubería / Presión (bar) / Profundidad (m)	Dimensiones del cráter (m)				Longitud de la rotura (m)	Distancia a los fragmentos de la tubería (m)	Ignición	Longitud de las llamas (m)	Tiempo (min) hasta la ignición / al apagado del sistema	Causa de fallo	Heridos / Muertos / Evacuados	Reporte Referencias
			Largo	Ancho	Profundidad	Área (m ²)								
	Kamenné, Slovakia	-												2007
39	22/03/2001 Weatherford, TX, EE.UU.	12 / - / - / 1979 / - / - / 2	5	5	-	19,6	-	-	-	Si	-	- / -	0 / 0 / -	- HInt Dossier, 2005
40	15/03/2002 Iron County, MI, EE.UU.	36 / 0,375 / X65 / 1968 / T / 51,7 / 2	36,6	9,1	9,1	261,6	6347,8	24,4	-	No	Ninguna	Ninguno / -	0 / 0 / 0	X DOT, 2002
41	11/06/2002 Easton, CA, EE.UU.	16 / - / - / - / - / - / 1,3	10	10	6	78,5	1256,6	-	-	Si	-	- / -	ATP	0 / 0 / - - HInt Dossier, 2005
42	30/11/2002 Brunswick, GA, EE.UU.	8 / - / - / - / D / 17,2 / -	3	3	1,5	7,1	28,3	-	-	No	Ninguna	- / -	-	- / - / - - HInt Dossier, 2005
43	02/02/2003 near Viola, IL, EE.UU.	24 / 0,312 / X52 / 1949 / D / 56 / -	-	12	7,6	-	-	4,6	275	Si	90-150	- / -	-	0 / 0 / 15 familias - MHIDAS, 2007; BAM, 2009
44	23/03/2003 Eaton, CO, EE.UU.	24 / 0,25 / X60 / 1978 / T / 56 / 3,7	30,5	15	6	359,3	5749	30,5	-	Si	150	- / -	-	0 / 0 / 3 familias - BAM, 2009
45	01/05/2003 Pierce County, WA, EE.UU.	26 / 0,281 / - / - 1957 / T / 43,6 / 1	30,5	6,1	3,7	146	1441,8	14	76,2	No	Ninguna	Ninguno / 90	C	0 / 0 / Cientos de hogares - MHIDAS, 2007
46	13/12/2003 Toledo, WA, EE.UU.	26 / 0,281 / - / - 1957 / T / 35 / 1	-	15,4	-	186,3	-	-	-	No	Ninguna	Ninguno / -	C	0 / 0 / 4 familias - HInt Dossier, 2005
47	25/03/2004 Woodward, IA, EE.UU.	16 / - / - / - / - / - 55,2 / -	9,1	4,6	-	33	-	-	-	Si	100	- / -	ATP	0 / 0 / 0 - MHIDAS, 2007
48	30/07/2004 Ghislenghien, 1991 / T / 80 /	40 / 0,512 / - / - 1991 / T / 80 /	10	10	4	78,5	837,8	-	150	Si	150-200	45 / -	ATP	132 / 24 / - X BAM, 2009

Apéndice E

ID	Fecha Lugar	Diámetro (in) /Espesor (in) /Grado / Año de instalación / Tipo de tubería / Presión (bar) / Profundidad (m)	Dimensiones del cráter (m)				Longitud de la rotura (m)	Distancia a los fragmentos de la tubería (m)	Ignición	Longitud de las llamas (m)	Tiempo (min) hasta la ignición / al apagado del sistema	Causa de fallo	Heridos / Muertos / Evacuados	Reporte	Referencias
			Largo	Ancho	Profundidad	Área (m ²)									
49	12/04/2005 Jefferson County, AR, EE.UU.	1,1 - / - / - / - / T / - / -	12	6,7	0,6	63	101	-	-	No	Ninguna	- / -	-	- / - / -	- MHIDAS, 2007
50	30/06/2005 Douglas County, KS, EE.UU.	20 / 0,312 / - / 1929 / T / 36-47 / 0,6	6,1	6,1	-	29,2	-	4,6	45,7	No	Ninguna	Ninguno / 110	FM	0 / 0 / 4	X PHMSA, 2012a
51	01/12/2005 Chicago, IL, EE.UU.	20 / - / - / - / D / - / 1,8	30,5	-	7,5	-	-	-	-	-	-	- / -	-	10 / 0 / -	- Chicago Tribune, 2005
52	19/12/2006 Cass County, MI, EE.UU.	24 / - / - / 1950s / D / 55,2 / 1	24,4	24,4	-	467,6	-	1,2	-	No	Ninguna	Ninguno / -	ATP	0 / 1 / 0	X MIFACE, 2007
53	12/03/2007 Baden- Württemberg, Germany	6 / - / - / - / - / 70 / -	5	2	2	8	42	-	-	Si	-	- / -	-	1 / - / -	- BAM, 2009
54	25/08/2008 Pilot Grove, MO, EE.UU.	24 / 0,281 / X48 / 1937 / T / 55,2 / 1,8	15,2	10	2,2	119,4	700,4	8,5	91,5	No	Ninguna	Ninguno / 39	C	0 / 0 / 0	X DOT, 2008
55	14/09/2008 Appomattox, VA, EE.UU.	30 / 0,344 / X52 / 1955 / T / 55,1 / -	23	11,3	4,6	204	2504	-	-	Si	-	- / -	-	5 / 0 / 23 familias	X PHMSA, 2008
56	01/04/2009 Căușeni, Moldova	48 / - / - / 1970s / T / - / 2	100	-	5	-	-	-	-	Si	50	- / -	-	- / - / -	- European Commission, 2009
57	04/05/2009 Palm City FL, EE.UU.	18 / 0,25 / X52 / 1959 / T / 58,9 / 1,1	35,5	5,2	2,8	145	1082,6	32,3	7,6	No	Ninguna	Ninguno / 119	C	3 / 0 / Si	X NTSB, 2013b

Apéndice E

ID	Fecha Lugar	Diámetro (in) /Espesor (in) /Grado / Año de instalación / Tipo de tubería / Presión (bar) / Profundidad (m)	Dimensiones del cráter (m)				Longitud de la rotura (m)	Distancia a Ignición los fragmentos de la tubería (m)	Longitud de las llamas (m)	Tiempo (min) hasta la ignición / al apagado del sistema	Causa de fallo	Heridos / Muertos / Evacuados	Reporte Referencias	
			Largo	Ancho	Profundidad	Área (m ²)								Volumen (m ³)
58	05/05/2009 Rockville, IN, EE.UU.	24 / 0,312 / B / 1940 / T / 54,6 / -	18	8,5	-	120,2	-	-	Si	213	- / -	C	0 / 0 / 49 familias	X DOT, 2009
59	10/05/2009 Moscow, Russia	36 / - / - / 1976 / - / - / 2,5	10,5	5	-	41,2	-	-	Si	100	- / -	FM	5 / 0 / Si	- BBC News, 2009
60	12/09/2009 Englehart, ON, Canada	36 / 0,4 / X65 / 1973 / - / 68,7 / 0,9	6,1	6,1	-	29,2	-	150	Si	-	Inmediata / 7	C	0 / 0 / 4 familias	X TSB, 2009
61	05/11/2009 Bushland, TX, EE.UU.	24 / 0,25 / X52 / 1948 / T / 53 / 1,5	17,4	-	4,3	238	-	10,7	Si	-	3 / 50	FM	3 / 0 / 200	X PHMSA, 2009
62	09/09/2010 San Bruno, CA, EE.UU.	30 / 0,375 / X42 /1956 / T / 25,9 / 0,9	21,9	7,9	-	136	-	8,5	Si	-	Inmediata / 95	EHO	58 / 8 / 300 familias	X NTSB, 2011
63	30/11/2010 Natchitoches Parish, LA, EE.UU.	30 / 0,312 / X52 / 1948 / T / 46,3 / 1,5	4,6	4,6	-	16,6	-	1,3	No	Ninguna	Ninguno / 100	FM	0 / 0 / 100 familias	X PHMSA, 2011b
64	08/12/2010 East Bernard, TX, USA	24 / 0,5 / X40 / 1947 / T / 49,6 / 1	30,5	7,6	-	182	-	3,7	No	Ninguna	Ninguno / Inmediata	C	0 / 0 / Si	X PHMSA, 2011c
65	19/02/2011 Beardmore, ON, Canada	36 / 0,36 / - / 1972 / - / 66,2 / 0,9	17	13	-	173,6	-	9	Si	-	Inmediata / 14	C	0 / 0 / 6	X TSB, 2011
66	20/07/2011 Gillette, WY, EE.UU.	30 / 0,438 / X70 / 2010 / T / 92,4 / 0,9	27	7,5	2,7	159	1145	25	No	Ninguna	Ninguno / 85	FM	0 / 0 / 0	X PHMSA, 2012b
67	14/11/2011 General Bravo, NL, Mexico	36 / - / - / - / T / - / -	20	20	5	314,2	4188,8	-	Si	15	- / -	ATP	1 / 0 / 0	- El Universal, 2011

Apéndice E

ID	Fecha Lugar	Diámetro (in) /Espesor (in) /Grado / Año de instalación / Tipo de tubería / Presión (bar) / Profundidad (m)	Dimensiones del cráter (m)				Longitud de la rotura (m)	Distancia a los fragmentos de la tubería (m)	Ignición	Longitud de las llamas (m)	Tiempo (min) hasta la ignición / al apagado del sistema	Causa de fallo	Heridos / Muertos / Evacuados	Referencias	
			Largo	Ancho	Profundidad	Área (m ²)									Volumen (m ³)
68	16/11/2011 Glouster, OH, EE.UU.	36 / 0,344 / X60 / 1993 / T / 52,5 /-	9,1	9,1	4,6	65	797,8	-	-	Si	-	- / -	FM	3 / 0 / 3 familias	X PHMSA, 2011d
69	21/11/2011 Batesville, MS, EE.UU.	24 / 0,25 / X70 / 1944 / T / 51,6 / 3,7	23,8	23,8	4,6	445	5457,2	1,4	-	Si	-	26 / 30	FM	0 / 0 / 20 familias	X PHMSA, 2013a
70	03/12/2011 Marengo County, AL, EE.UU.	36 / - / X60 / 1964 / R / 54,8 / -	24,2	16,8	4,3	319,3	3661,4	-	61	Si	30	Inmediata / 17	-	0 / 0 / 0	X PHMSA, 2011e
71	18/01/2012, Tresana, Italy	30 / - / - / - / - / 59 / -	20	20	7	314,2	5864,3	-	-	Si	200	- / -	-	9 / 1 / -	- Kraus, 2014
72	25/04/2012 Hinton, IA, EE.UU.	24 / - / - / - / - / /-	30	10,7	9,2	252	6185,2	-	-	Si	91	- / -	ATP	2 / 0 / -	- The Gazette, 2014
73	06/06/2012 Laketon, TX, EE.UU.	26 / 0,25 / X52 / 1957 / - / 47,4 / -	18,2	5	-	71,5	-	15,2	-	Si	-	Inmediata / -	-	0 / 0 / 0	X PHMSA, 2012c
74	28/06/2012 Buick, BC, Canada	16 / 0,25 / X52 / 1960 / R / 66,6 / 0,5	17	7,6	1,1	101,5	298	17	20	Si	-	Inmediata / Apagado anteriormente	FM	0 / 0 / 0	X TSB, 2013a
75	11/12/2012 Sissonville, WV, EE.UU.	20 / 0,281 / X60 / 1967 / T / 64,1 /-	22,9	10,9	4,3	196	2248	11,5	12,2	Si	31	Inmediata / >60	C	0 / 0 / 0	X NTSB, 2014b
76	20/08/2013 Pittsburg County, OK, EE.UU.	20 / - / - / - / - / /-	9,1	9,1	6,1	65	1058	-	-	Si	-	- / -	-	0 / 0 / 0	- NewsOn6, 2013
77	08/10/2013 Harper County, OK, EE.UU.	30 / 0,344 / X52 / 1954 / T / 55,8 / 1,5	67	9,1	4,6	479	5874	67	-	Si	61	- / -	-	0 / 0 / Si	X PHMSA, 2013b

Apéndice E

ID	Fecha Lugar	Diámetro (in) /Espesor (in) /Grado / Año de instalación / Tipo de tubería / Presión (bar) / Profundidad (m)	Dimensiones del cráter (m)				Longitud de la rotura (m)	Distancia a los fragmentos de la tubería (m)	Ignición	Longitud de las llamas (m)	Tiempo (min) hasta la ignición / al apagado del sistema	Causa de fallo	Heridos / Muertos / Evacuados	Reporte Referencias	
			Largo	Ancho	Profundidad	Área (m ²)									Volumen (m ³)
78	17/10/2013 Fort McMurray, AB, Canada	36 / 0,465 / - / 2008 / T / 92 / -	50	15	5	589	7854	-	130	No	Ninguna	Ninguno / 745	FM	0 / 0 / 0	X TSB, 2013b
79	29/11/2013 Houstonia, MO, EE.UU.	30 / 0,312 / X60 / 1962 / T / 61,6 / 1	9,5	9,5	-	71	-	-	61	Si	91	- / -	C	0 / 0 / 3 familias	- PHMSA, 2014d
80	25/01/2014 Otterburne, MB, Canada	30 / 0,37 / X52 / 1960 / - / 63.3 / -	24	12,5	3	235,6	1885	14,4	100	Si	200-300	Inmediata / -	FM	0 / 0 / 5 familias	X TSB, 2014c
81	13/02/2014 Adair County, KY, EE.UU.	30 / 0,323 / X65 / 1965 / T / 66,3 / 9,1	-	15,2	18,3	181,5	-	-	91	Si	-	- / -	-	2 / 0 / 23 familias	- PHMSA, 2014c
82	05/04/2014 Marshall County, WV, USA	12 / - / - / - / R / - / -	3	3	-	7,1	-	-	-	Si	-	- / -	-	0 / 0 / Si	- The Intelligencer, 2014
83	24/04/2014 France	8,6 / - / - / 1976 / - / 34 / 1	4	4	1,5	12,6	50,3	-	-	No	Ninguna	Ninguno / -	FM	- / - / -	- ARIA, 2014b
84	26/05/2014 Warren, MN, EE.UU.	24 / - / - / - / T / 56,9 / -	9,1	9,1	4,6	65	797,8	-	36,6	Si	30,5	- / -	-	0 / 0 / 10 familias	- DRC, 2014
85	27/06/2014 East Godavari, AP, India	18 / - / X60 / 2001 / - / 44,1 / 5	7	7	7	38,5	718,4	0,5	-	Si	>25	- / -	C	40 / 18 / -	- Mishra & Klaus-Dieter, 2015
86	23/10/2014 Ludwigshafen, Germany	16 / - / - / - / D / - / -	10	10	6	78,5	1256,6	-	-	Si	200	- / -	ATP	11 / 1 / Si	- Deutsche Welle, 2014
87	14/01/2015 Brandon, MS, EE.UU.	30 / 0,375 / X52 / 1952 / T / 52,9 / -	9	8	-	56,5	-	-	-	Si	>60	- / -	FM	0 / 0 / -	X PHMSA, 2015a

Apéndice E

ID	Fecha Lugar	Diámetro (in) /Espesor (in) /Grado / Año de instalación / Tipo de tubería / Presión (bar) / Profundidad (m)	Dimensiones del cráter (m)				Longitud de la rotura (m)	Distancia a los fragmentos de la tubería (m)	Ignición	Longitud de las llamas (m)	Tiempo (min) hasta la ignición / al apagado del sistema	Causa de fallo	Heridos / Muertos / Evacuados	Reporte	Referencias
			Largo	Ancho	Profundidad	Área (m ²)									
88	29/01/2015 Bowling Green, MO, EE.UU.	42 / - / - / 2008 / T / - / -	6,1	6,1	-	29,2	-	-	-	No	Ninguna	Ninguno / -	FM	0 / 0 / 50 familias	- The People's Tribune, 2015
89	17/04/2015 Fresno, CA, EE.UU.	12 / 0,254 / X42 / 1962 / D / - / 1.1	6,1	5,6	2.2	26,8	157,4	0,8	6	Si	45	Inmediata / -	ATP	13 / 1 / -	X Exponent, 2015
90	03/08/2015 Falfurrias, TX, EE.UU.	16 / 0,25 / X42 / 1947 / - / 57 / -	21,3	9,1	-	152,2	-	16,8	-	-	-	- / -	C	2 / 0 / Si	X PHMSA, 2015b

Tipo de tubería = T: Transmisión, D: Distribución, R: Recolección.

Causa de fallo = C: Corrosión, FM: Fallo Mecánico, EHO: Error humano/operacional, ATP: Actividades de terceros.

**ANÁLISIS DEL EFECTO DE LOS PARÁMETROS DE LA TUBERÍA EN LAS
DIMENSIONES DEL CRÁTER.**

El siguiente es un análisis del efecto de los parámetros de las tuberías (tales como el diámetro, la presión de operación, la longitud de la rotura y la profundidad de instalación) en las dimensiones del cráter. El software Minitab 17 fue utilizado para el análisis de los datos. Los resultados se presentan a través de gráficos de probabilidad normal de los efectos, los cuales comparan la magnitud y la relevancia estadística de los efectos de los parámetros de la tubería en una variable de salida (en este caso, cada una de las dimensiones del cráter). Los efectos estandarizados se muestran en relación con una línea de ajuste de distribución para el caso en que todos los efectos son 0. Los efectos significativos positivos tienen una etiqueta y caen hacia el lado derecho del gráfico, permitiendo comparar sus magnitudes relativas. Es importante mencionar que los efectos de los parámetros de la tubería se evaluaron de manera independiente, es decir, sin tener en cuenta la interacción entre ellos.

También se utilizó el gráfico de Pareto para determinar la magnitud y la importancia de los efectos. Este gráfico muestra el valor absoluto de los efectos (desde el efecto más grande hasta el efecto más pequeño) y dibuja una línea de referencia que depende del nivel de significancia (α); cualquier efecto que se extienda más allá de esta línea de referencia es estadísticamente significativo.

F.1. Efecto de los parámetros de la tubería en la longitud del cráter

La Fig. F-1 muestra el efecto de los parámetros de la tubería en la longitud del cráter. Se observa que la longitud de la rotura de la tubería (Factor C) tiene un efecto positivo significativo, mientras que el resto de los parámetros tiene un efecto estadísticamente insignificante.

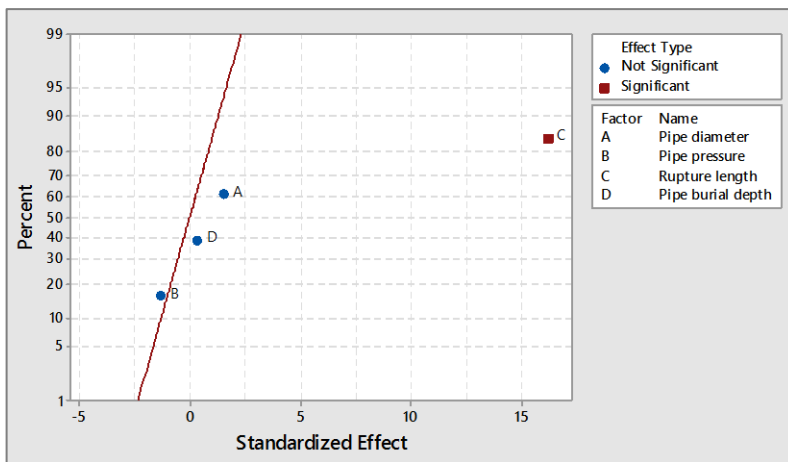


Fig. F-1. Gráfico normal de efectos estandarizados de los parámetros de la tubería en la longitud del cráter ($\alpha = 0,05$).

El diagrama de Pareto muestra los efectos en términos de magnitud (Fig. F-2).

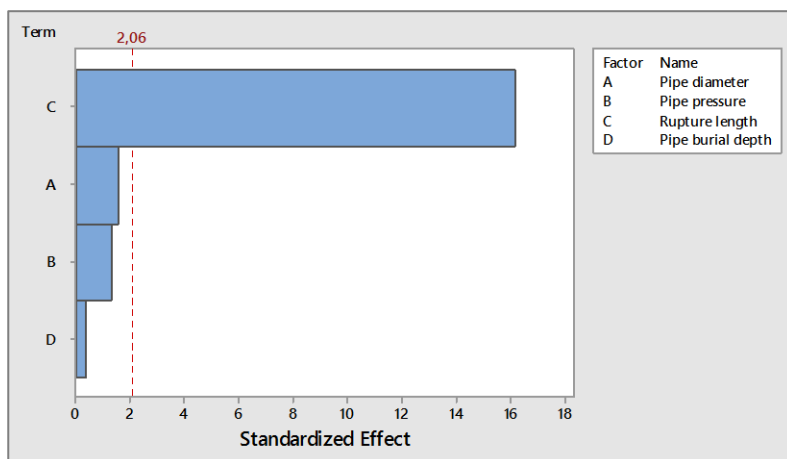


Fig. F-2. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados de los parámetros de la tubería en la longitud del cráter ($\alpha = 0,05$).

F.2. Efecto de los parámetros de la tubería en la profundidad del cráter

De acuerdo con la Fig. F-3, el parámetro de la tubería que presenta el efecto más significativo sobre la profundidad del cráter es la profundidad de instalación de la tubería (Factor D). El resto de factores tienen un efecto menos significativo.

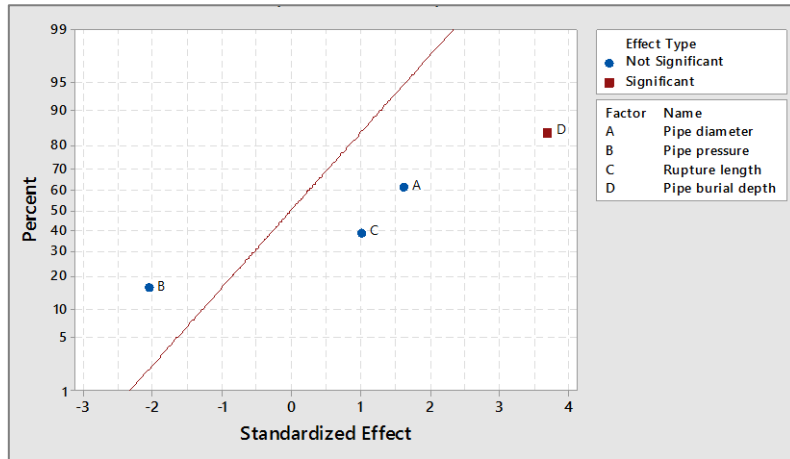


Fig. F-3. Gráfico normal de efectos estandarizados de los parámetros de la tubería en la profundidad del cráter ($\alpha = 0,05$).

El diagrama de Pareto también permite confirmar estos efectos activos (Fig. F-4).

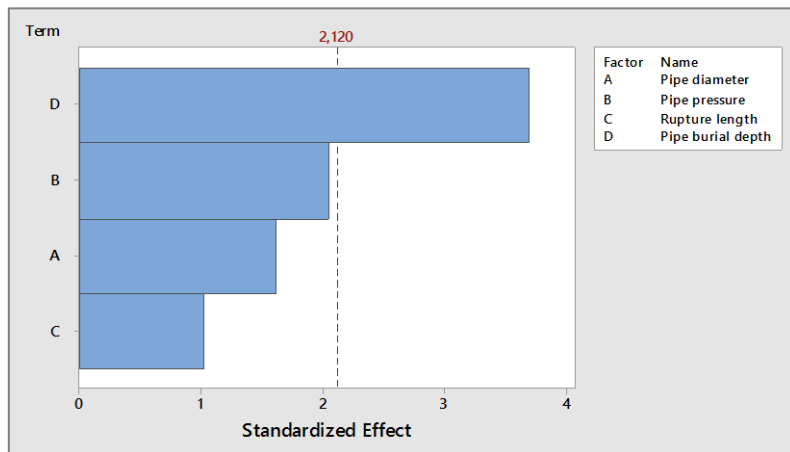


Fig. F-4. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados de los parámetros de la tubería en la profundidad del cráter ($\alpha = 0,05$).

F.3. Efecto de los parámetros de la tubería en la anchura del cráter

En la Fig. F-5 se observa –al igual que en los casos anteriores– que todos los parámetros de la tubería presentan alguna diferencia, aunque el factor A (diámetro de la tubería) es el que presenta un efecto más significativo desde el punto de vista estadístico sobre la anchura del cráter.

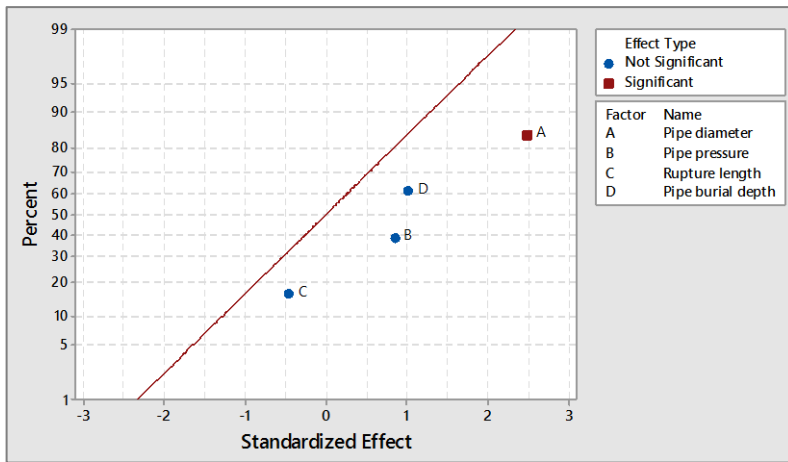


Fig. F-5. Gráfico normal de efectos estandarizados de los parámetros de la tubería en la anchura del cráter ($\alpha = 0,05$).

El gráfico de Pareto (Fig. F-6) confirma la magnitud y la importancia de los efectos.

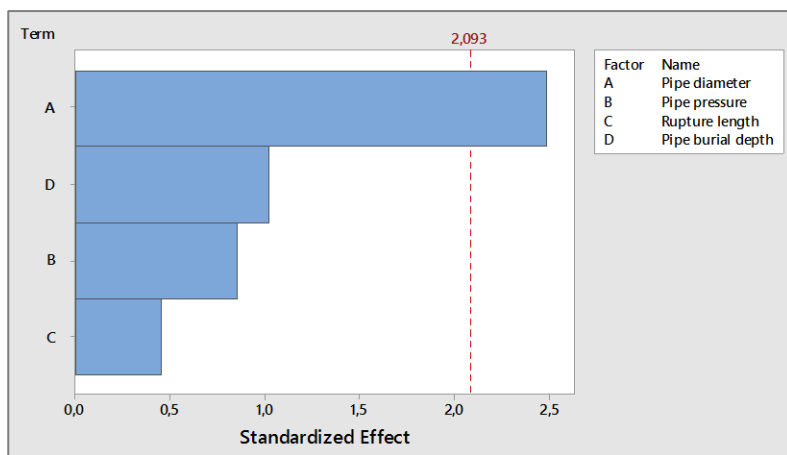


Fig. F-6. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados de los parámetros de la tubería en la anchura del cráter ($\alpha = 0,05$).

CÁLCULO DEL FACTOR DE REDUCCIÓN «q» PARA LAS CONFIGURACIONES REALES DE TUBERÍAS ENCONTRADAS EN LA LITERATURA Y EN OTROS ARREGLOS.

G.1. Factor de reducción para $r < R$

G.1.1. Caso 1: $r = 12$ in, $R = 18$ in, $d = 50$ in

Tabla G-1. Datos de las tuberías paralelas del caso 1.

Tubería fuente	Tubería objetivo	Distancia
$r = 12$ in = 0,305 m	$R = 18$ in = 0,457 m	$d = 50$ in = 1,27 m

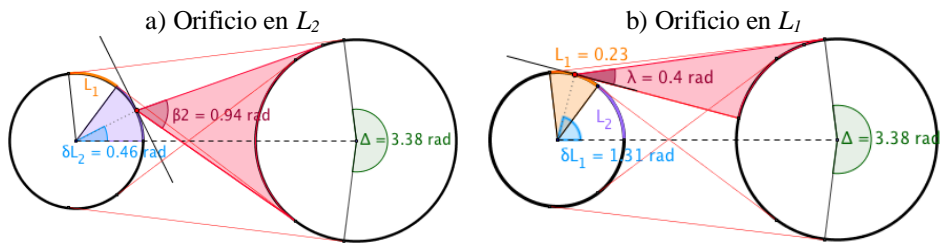


Fig. G-1. Diagrama de las tuberías paralelas del caso 1.

1. Calculando Δ

$$\Delta = 2 \left(\pi - \cos^{-1} \left(\frac{R - r}{d} \right) \right) = 2 \left(\pi - \cos^{-1} \left(\frac{0,457 - 0,305}{1,27} \right) \right) = 3,382 \text{ rad}$$

Orificio en la mitad del segmento L_2 (Fig. G-1a)

2. Cálculo de L_2

$$L_2 = r \cdot \cos^{-1} \left(\frac{R + r}{d} \right) = 0,305 \cdot \cos^{-1} \left(\frac{0,457 + 0,305}{1,27} \right) = 0,283 \text{ m}$$

3. Cálculo de δ_t

$$\delta_t = \frac{L_2}{r} = \frac{0,283}{0,305} = 0,928 \text{ rad}$$

4. Cálculo de δ_{L_2}

$$\delta_{L_2} = \frac{L_2}{2r} = \frac{0,283}{2 \cdot 0,305} = 0,464 \text{ rad}$$

5. Cálculo de β

$$\begin{aligned} \beta &= \sin^{-1} \frac{R}{\sqrt{d^2 + r^2 - 2rd \cdot \cos \delta_{L_2}}} \\ &= \sin^{-1} \frac{0,457}{\sqrt{1,27^2 + 0,305^2 - 2(0,305 \cdot 1,27) \cdot \cos(0,464)}} \end{aligned}$$

$$\beta = 0,471 \text{ rad}$$

6. Cálculo de P_{2-L_2}

$$P_{2-L_2} = \frac{2\beta}{\pi} = \frac{2(0,471)}{\pi} = 0,3$$

Orificio en la mitad del segmento L_1 (Fig. G-1b)

7. Cálculo de λ

Se calcula geoméricamente (véase la Fig. G-1b)

$$\lambda = 0,4 \text{ rad}$$

8. Cálculo de P_{2-L_1}

$$P_{2-L_1} = \frac{\lambda}{\pi} = \frac{0,4}{\pi} = 0,127$$

Factor de reducción q

9. Por lo tanto:

$$q = \frac{P_{2-L_1}}{P_{2-L_2}} = \frac{0,127}{0,3} = 0,423$$

G.1.2. Caso 2: $r = 4$ in, $R = 9$ in, $d = 15$ in

Tabla G-2. Datos de las tuberías paralelas del caso 2.

Tubería fuente	Tubería objetivo	Distancia
$r = 4$ in = 0,102 m	$R = 9$ in = 0,229 m	$d = 15$ in = 0,381 m

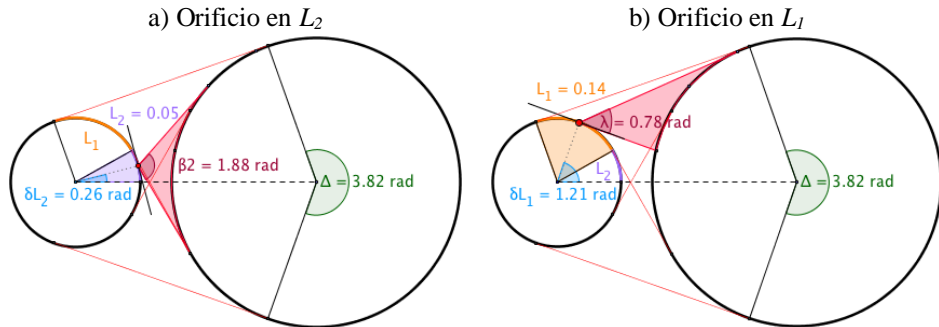


Fig. G-2. Diagrama de las tuberías paralelas del caso 2.

1. Calculando Δ

$$\Delta = 2 \left(\pi - \cos^{-1} \left(\frac{0,229 - 0,102}{0,381} \right) \right) = 3,821 \text{ rad}$$

Orificio en la mitad del segmento L_2 (Fig. G-2a)

2. Cálculo de L_2

$$L_2 = 0,102 \cdot \cos^{-1} \left(\frac{0,229 + 0,102}{0,381} \right) = 0,052 \text{ m}$$

3. Cálculo de δ_t

$$\delta_t = \frac{0,052}{0,102} = 0,52 \text{ rad}$$

4. Cálculo de δ_{L_2}

$$\delta_{L_2} = \frac{0,052}{2 \cdot 0,102} = 0,26 \text{ rad}$$

5. Cálculo de β

$$\beta = \sin^{-1} \frac{0,229}{\sqrt{0,381^2 + 0,102^2 - 2(0,102 \cdot 0,381) \cdot \cos(0,26)}}$$

$$\beta = 0,94 \text{ rad}$$

6. Cálculo de P_{2-L_2}

$$P_{2-L_2} = \frac{2(0,94)}{\pi} = 0,598$$

Orificio en la mitad del segmento L_1 (Fig. G-2b)

7. Cálculo de λ

Se calcula geoméricamente (véase la Fig. G-2b)

$$\lambda = 0,78 \text{ rad}$$

8. Cálculo de P_{2-L_1}

$$P_{2-L_1} = \frac{0,78}{\pi} = 0,248$$

Factor de reducción q

9. Por lo tanto:

$$q = \frac{0,248}{0,598} = 0,415$$

G.1.3. Caso 3: $r = 3$ in, $R = 4$ in, $d = 14,68$ in

Tabla G-3. Datos de las tuberías paralelas del caso 3.

Tubería fuente	Tubería objetivo	Distancia
$r = 3$ in = 0,076 m	$R = 4$ in = 0,102 m	$d = 14,68$ in = 0,373 m

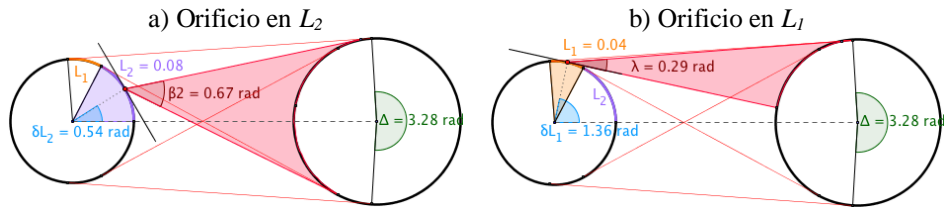


Fig. G-3. Diagrama de las tuberías paralelas del caso 3.

1. Calculando Δ

$$\Delta = 2 \left(\pi - \cos^{-1} \left(\frac{0,102 - 0,076}{0,373} \right) \right) = 3,281 \text{ rad}$$

Orificio en la mitad del segmento L_2 (Fig. G-3a)

2. Cálculo de L_2

$$L_2 = 0,076 \cdot \cos^{-1} \left(\frac{0,102 + 0,076}{0,373} \right) = 0,082 \text{ m}$$

3. Cálculo de δ_t

$$\delta_t = \frac{0,082}{0,076} = 1,079 \text{ rad}$$

4. Cálculo de δ_{L_2}

$$\delta_{L_2} = \frac{0,082}{2 \cdot 0,076} = 0,539 \text{ rad}$$

5. Cálculo de β

$$\beta = \sin^{-1} \frac{0,102}{\sqrt{0,373^2 + 0,076^2 - 2(0,076 \cdot 0,373) \cdot \cos(0,539)}}$$

$$\beta = 0,335 \text{ rad}$$

6. Cálculo de P_{2-L_2}

$$P_{2-L_2} = \frac{2(0,335)}{\pi} = 0,213$$

Orificio en la mitad del segmento L_1 (Fig. G-3b)

7. Cálculo de λ

Se calcula geoméricamente (véase la Fig. G-3b)

$$\lambda = 0,29 \text{ rad}$$

8. Cálculo de P_{2-L_1}

$$P_{2-L_1} = \frac{0,29}{\pi} = 0,092$$

Factor de reducción q

9. Por lo tanto:

$$q = \frac{0,092}{0,213} = 0,432$$

G.1.4. Caso 4: $r = 12$ in, $R = 24$ in, $d = 80$ in

Tabla G-4. Datos de las tuberías paralelas del caso 4.

Tubería fuente	Tubería objetivo	Distancia
$r = 12$ in = 0,305 m	$R = 24$ in = 0,61 m	$d = 80$ in = 2,032 m

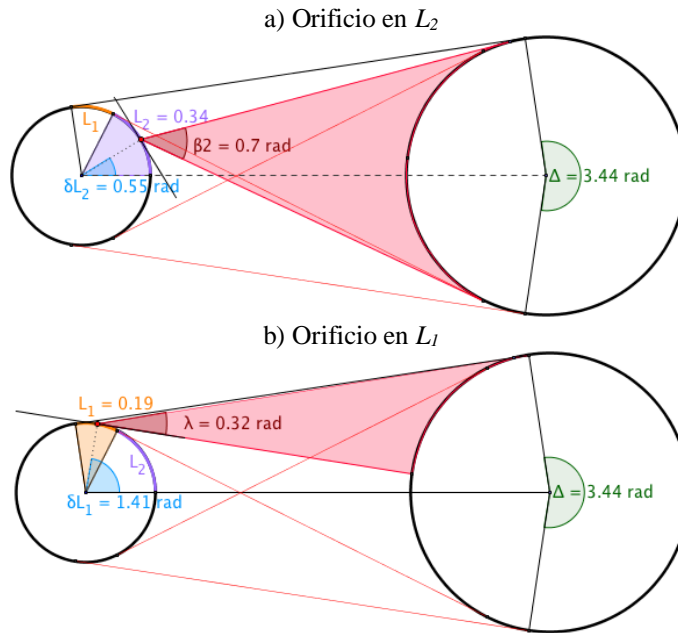


Fig. G-4. Diagrama de las tuberías paralelas del caso 4.

1. Calculando Δ

$$\Delta = 2 \left(\pi - \cos^{-1} \left(\frac{0,61 - 0,305}{2,032} \right) \right) = 3,443 \text{ rad}$$

Orificio en la mitad del segmento L_2 (Fig. G-4a)

2. Cálculo de L_2

$$L_2 = 0,305 \cdot \cos^{-1} \left(\frac{0,61 + 0,305}{2,032} \right) = 0,337 \text{ m}$$

3. Cálculo de δ_t

$$\delta_t = \frac{0,337}{0,305} = 1,105 \text{ rad}$$

4. Cálculo de δ_{L_2}

$$\delta_{L_2} = \frac{0,337}{2 \cdot 0,305} = 0,552 \text{ rad}$$

5. Cálculo de β

$$\beta = \sin^{-1} \frac{0,61}{\sqrt{2,032^2 + 0,305^2 - 2(0,305 \cdot 2,032) \cdot \cos(0,552)}}$$

$$\beta = 0,35 \text{ rad}$$

6. Cálculo de P_{2-L_2}

$$P_{2-L_2} = \frac{2\beta}{\pi} = \frac{2(0,35)}{\pi} = 0,223$$

Orificio en la mitad del segmento L_1 (Fig. G-4b)

7. Cálculo de λ

Se calcula geoméricamente (véase la Fig. G-4b)

$$\lambda = 0,32 \text{ rad}$$

8. Cálculo de P_{2-L_1}

$$P_{2-L_1} = \frac{0,32}{\pi} = 0,102$$

Factor de reducción q

9. Por lo tanto:

$$q = \frac{0,102}{0,223} = 0,457$$

G.1.5. Caso 5: $r = 18$ in, $R = 24$ in, $d = 100$ in

Tabla G-5. Datos de las tuberías paralelas del caso 5.

Tubería fuente	Tubería objetivo	Distancia
$r = 18$ in = 0,457 m	$R = 24$ in = 0,61 m	$d = 100$ in = 2,54 m

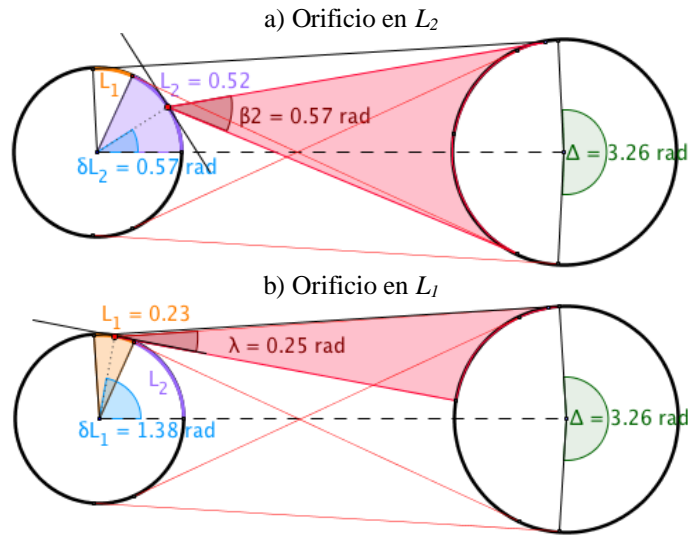


Fig. G-5. Diagrama de las tuberías paralelas del caso 5.

1. Calculando Δ

$$\Delta = 2 \left(\pi - \cos^{-1} \left(\frac{0,61 - 0,457}{2,54} \right) \right) = 3,262 \text{ rad}$$

Orificio en la mitad del segmento L_2 (Fig. G-5a)

2. Cálculo de L_2

$$L_2 = 0,457 \cdot \cos^{-1} \left(\frac{0,61 + 0,457}{2,54} \right) = 0,52 \text{ m}$$

3. Cálculo de δ_t

$$\delta_t = \frac{0,52}{0,457} = 1,138 \text{ rad}$$

4. Cálculo de δ_{L_2}

$$\delta_{L_2} = \frac{0,52}{2 \cdot 0,457} = 0,569 \text{ rad}$$

5. Cálculo de β

$$\beta = \sin^{-1} \frac{0,61}{\sqrt{2,54^2 + 0,457^2 - 2(0,457 \cdot 2,54) \cdot \cos(0,569)}}$$

$$\beta = 0,285 \text{ rad}$$

6. Cálculo de P_{2-L_2}

$$P_{2-L_2} = \frac{2(0,285)}{\pi} = 0,181$$

Orificio en la mitad del segmento L_1 (Fig. G-5b)

7. Cálculo de λ

Se calcula geoméricamente (véase la Fig. G-5b)

$$\lambda = 0,25 \text{ rad}$$

8. Cálculo de P_{2-L_1}

$$P_{2-L_1} = \frac{0,25}{\pi} = 0,08$$

Factor de reducción q

9. Por lo tanto:

$$q = \frac{0,08}{0,181} = 0,442$$

G.2. Factor de reducción para $r > R$

G.2.1. Caso 6: $r = 24$ in, $R = 18$ in, $d = 150$ in

Tabla G-6. Datos de las tuberías paralelas del caso 6.

Tubería fuente	Tubería objetivo	Distancia
$r = 24$ in = 0,61 m	$R = 18$ in = 0,457 m	$d = 150$ in = 3,81 m

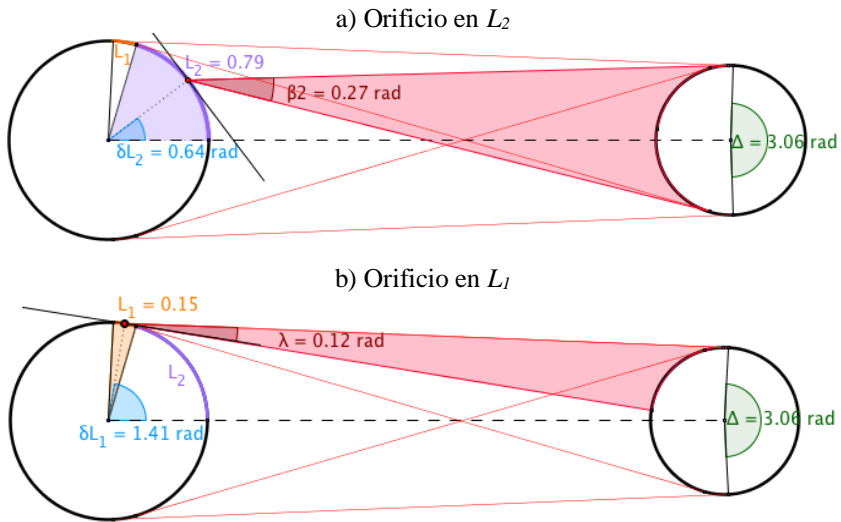


Fig. G-6. Diagrama de las tuberías paralelas del caso 6.

1. Calculando Δ

$$\Delta = 2 \left(\pi - \cos^{-1} \left(\frac{0,457 - 0,61}{3,81} \right) \right) = 3,061 \text{ rad}$$

Orificio en la mitad del segmento L_2 (Fig. G-6a)

2. Cálculo de L_2

$$L_2 = 0,61 \cdot \cos^{-1} \left(\frac{0,457 + 0,61}{3,81} \right) = 0,785 \text{ m}$$

3. Cálculo de δ_t

$$\delta_t = \frac{0,785}{0,62} = 1,287 \text{ rad}$$

4. Cálculo de δ_{L_2}

$$\delta_{L_2} = \frac{0,785}{2 \cdot 0,61} = 0,643 \text{ rad}$$

5. Cálculo de β

$$\beta = \sin^{-1} \frac{0,457}{\sqrt{3,81^2 + 0,61^2 - 2(0,61 \cdot 3,81) \cdot \cos(0,643)}}$$

$$\beta = 0,137 \text{ rad}$$

6. Cálculo de P_{2-L_2}

$$P_{2-L_2} = \frac{2(0,137)}{\pi} = 0,087$$

Orificio en la mitad del segmento L_1 (Fig. G-6b)

7. Cálculo de λ

Se calcula geoméricamente (véase la Fig. G-6b)

$$\lambda = 0,12 \text{ rad}$$

8. Cálculo de P_{2-L_1}

$$P_{2-L_1} = \frac{0,12}{\pi} = 0,038$$

Factor de reducción q

9. Por lo tanto:

$$q = \frac{0,038}{0,087} = 0,437$$

G.2.2. Caso 7: $r = 21$ in, $R = 18$ in, $d = 393,7$ in

Tabla G-7. Datos de las tuberías paralelas del caso 7.

Tubería fuente	Tubería objetivo	Distancia
$r = 21$ in = 0,533 m	$R = 18$ in = 0,457 m	$d = 393,7$ in = 10 m

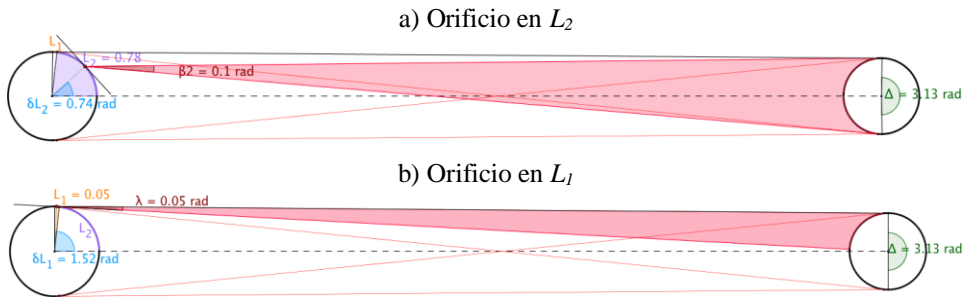


Fig. G-7. Diagrama de las tuberías paralelas del caso 7.

1. Calculando Δ

$$\Delta = 2 \left(\pi - \cos^{-1} \left(\frac{0,457 - 0,533}{10} \right) \right) = 3,126 \text{ rad}$$

Orificio en la mitad del segmento L_2 (Fig. G-7a)

2. Cálculo de L_2

$$L_2 = 0,533 \cdot \cos^{-1} \left(\frac{0,457 + 0,533}{10} \right) = 0,784 \text{ m}$$

3. Cálculo de δ_t

$$\delta_t = \frac{0,784}{0,533} = 1,471 \text{ rad}$$

4. Cálculo de δ_{L_2}

$$\delta_{L_2} = \frac{0,784}{2 \cdot 0,533} = 0,735 \text{ rad}$$

5. Cálculo de β

$$\beta = \sin^{-1} \frac{0,457}{\sqrt{10^2 + 0,533^2 - 2(0,533 \cdot 10) \cdot \cos(0,735)}}$$

$$\beta = 0,048 \text{ rad}$$

6. Cálculo de P_{2-L_2}

$$P_{2-L_2} = \frac{2(0,048)}{\pi} = 0,031$$

Orificio en la mitad del segmento L_1 (Fig. G-7b)

7. Cálculo de λ

Se calcula geoméricamente (véase la Fig. G-7b)

$$\lambda = 0,05 \text{ rad}$$

8. Cálculo de P_{2-L_1}

$$P_{2-L_1} = \frac{0,05}{\pi} = 0,016$$

Factor de reducción q

9. Por lo tanto:

$$q = \frac{0,016}{0,031} = 0,516$$

G.2.3. Caso 8: $r = 15$ in, $R = 12$ in, $d = 267$ in

Tabla G-8. Datos de las tuberías paralelas del caso 8.

Tubería fuente	Tubería objetivo	Distancia
$r = 15$ in = 0,381 m	$R = 12$ in = 0,305 m	$d = 267$ in = 6,782 m

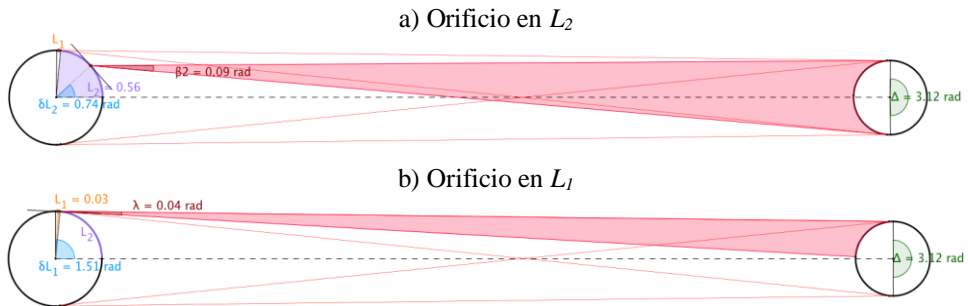


Fig. G-8. Diagrama de las tuberías paralelas del caso 8.

1. Calculando Δ

$$\Delta = 2 \left(\pi - \cos^{-1} \left(\frac{0,305 - 0,381}{6,782} \right) \right) = 3,119 \text{ rad}$$

Orificio en la mitad del segmento L_2 (Fig. G-8a)

2. Cálculo de L_2

$$L_2 = 0,381 \cdot \cos^{-1} \left(\frac{0,305 + 0,381}{6,782} \right) = 0,56 \text{ m}$$

3. Cálculo de δ_t

$$\delta_t = \frac{0,56}{0,381} = 1,47 \text{ rad}$$

4. Cálculo de δ_{L_2}

$$\delta_{L_2} = \frac{0,56}{2 \cdot 0,381} = 0,735 \text{ rad}$$

5. Cálculo de β

$$\beta = \sin^{-1} \frac{0,305}{\sqrt{6,782^2 + 0,381^2 - 2(0,381 \cdot 6,782) \cdot \cos(0,735)}}$$

$$\beta = 0,047 \text{ rad}$$

6. Cálculo de P_{2-L_2}

$$P_{2-L_2} = \frac{2(0,047)}{\pi} = 0,03$$

Orificio en la mitad del segmento L_1 (Fig. G-8b)

7. Cálculo de λ

Se calcula geoméricamente (véase la Fig. G-8b)

$$\lambda = 0,04 \text{ rad}$$

8. Cálculo de P_{2-L_1}

$$P_{2-L_1} = \frac{0,04}{\pi} = 0,013$$

Factor de reducción q

9. Por lo tanto:

$$q = \frac{0,013}{0,03} = 0,433$$

G.2.4. Caso 9: $r = 12$ in, $R = 9$ in, $d = 312$ in

Tabla G-9. Datos de las tuberías paralelas del caso 9.

Tubería fuente	Tubería objetivo	Distancia
$r = 12$ in = 0,305 m	$R = 9$ in = 0,229 m	$d = 312$ in = 7,925 m

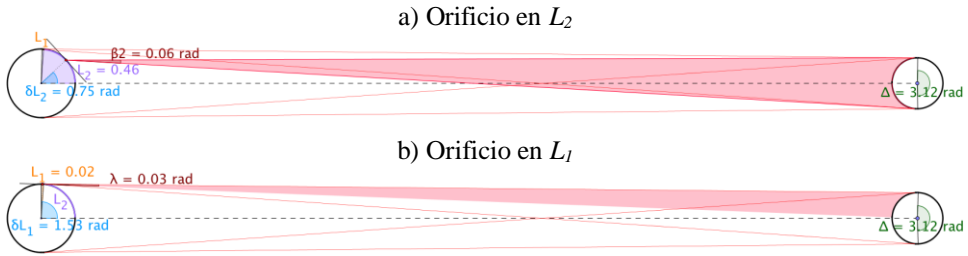


Fig. G-9. Diagrama de las tuberías paralelas del caso 9.

1. Calculando Δ

$$\Delta = 2 \left(\pi - \cos^{-1} \left(\frac{0,229 - 0,305}{7,925} \right) \right) = 3,122 \text{ rad}$$

Orificio en la mitad del segmento L_2 (Fig. G-9a)

2. Cálculo de L_2

$$L_2 = 0,305 \cdot \cos^{-1} \left(\frac{0,229 + 0,305}{7,925} \right) = 0,459 \text{ m}$$

3. Cálculo de δ_t

$$\delta_t = \frac{0,459}{0,305} = 1,505 \text{ rad}$$

4. Cálculo de δ_{L_2}

$$\delta_{L_2} = \frac{0,459}{2 \cdot 0,305} = 0,752 \text{ rad}$$

5. Cálculo de β

$$\beta = \sin^{-1} \frac{0,229}{\sqrt{7,925^2 + 0,305^2 - 2(0,305 \cdot 7,925) \cdot \cos(0,752)}}$$

$$\beta = 0,03 \text{ rad}$$

6. Cálculo de P_{2-L_2}

$$P_{2-L_2} = \frac{2(0,03)}{\pi} = 0,019$$

Orificio en la mitad del segmento L_1 (Fig. G-9b)

7. Cálculo de λ

Se calcula geoméricamente (véase la Fig. G-9b)

$$\lambda = 0,03 \text{ rad}$$

8. Cálculo de P_{2-L_1}

$$P_{2-L_1} = \frac{0,03}{\pi} = 0,01$$

Factor de reducción q

9. Por lo tanto:

$$q = \frac{0,01}{0,019} = 0,526$$

G.2.5. Caso 10: $r = 8$ in, $R = 3,31$ in, $d = 129,4$ in

Tabla G-10. Datos de las tuberías paralelas del caso 10.

Tubería fuente	Tubería objetivo	Distancia
$r = 8$ in = 0,203 m	$R = 3,31$ in = 0,084 m	$d = 129,4$ in = 3,287 m

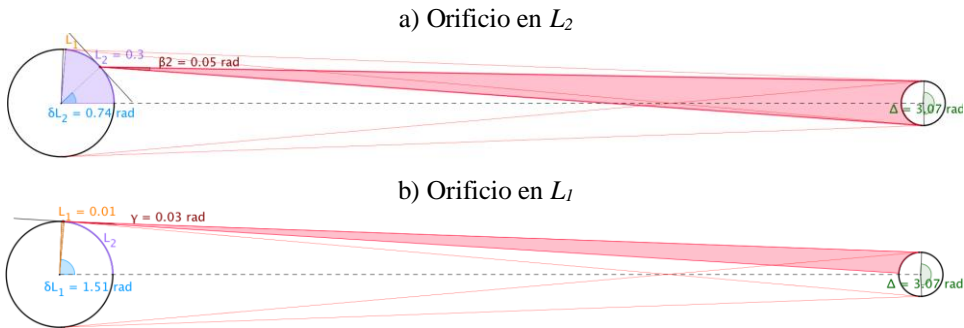


Fig. G-10. Diagrama de las tuberías paralelas del caso 10.

1. Calculando Δ

$$\Delta = 2 \left(\pi - \cos^{-1} \left(\frac{0,084 - 0,203}{3,287} \right) \right) = 3,069 \text{ rad}$$

Orificio en la mitad del segmento L_2 (Fig. G-10a)

2. Cálculo de L_2

$$L_2 = 0,203 \cdot \cos^{-1} \left(\frac{0,084 + 0,203}{3,287} \right) = 0,301 \text{ m}$$

3. Cálculo de δ_t

$$\delta_t = \frac{0,301}{0,203} = 1,483 \text{ rad}$$

4. Cálculo de δ_{L_2}

$$\delta_{L_2} = \frac{0,301}{2 \cdot 0,203} = 0,741 \text{ rad}$$

5. Cálculo de β

$$\beta = \sin^{-1} \frac{0,084}{\sqrt{3,287^2 + 0,203^2 - 2(0,203 \cdot 3,287) \cdot \cos(0,741)}}$$

$$\beta = 0,027 \text{ rad}$$

6. Cálculo de P_{2-L_2}

$$P_{2-L_2} = \frac{2(0,027)}{\pi} = 0,017$$

Orificio en la mitad del segmento L_1 (Fig. G-10b)

7. Cálculo de λ

Se calcula geoméricamente (véase la Fig. G-10b)

$$\lambda = 0,03 \text{ rad}$$

8. Cálculo de P_{2-L_1}

$$P_{2-L_1} = \frac{0,03}{\pi} = 0,01$$

Factor de reducción q

9. Por lo tanto:

$$q = \frac{0,01}{0,017} = 0,588$$

G.3. Factor de reducción para $r = R$

G.3.1. Caso 11: $r = 24$ in, $R = 24$ in, $d = 150$ in

Tabla G-11. Datos de las tuberías paralelas del caso 11.

Tubería fuente	Tubería objetivo	Distancia
$r = 24$ in = 0,61 m	$R = 24$ in = 0,61 m	$d = 150$ in = 3,81 m

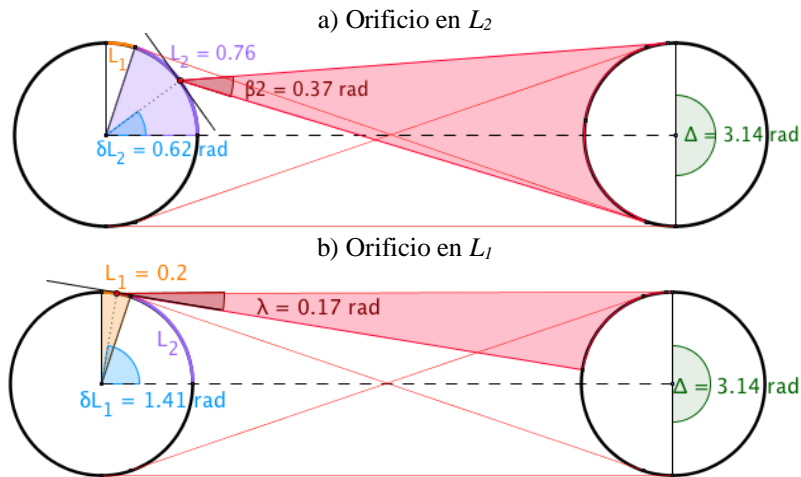


Fig. G-11. Diagrama de las tuberías paralelas del caso 11.

1. Calculando Δ

$$\Delta = 2 \left(\pi - \cos^{-1} \left(\frac{0,61 - 0,61}{3,81} \right) \right) = 3,142 \text{ rad}$$

Orificio en la mitad del segmento L_2 (Fig. G-11a)

2. Cálculo de L_2

$$L_2 = 0,61 \cdot \cos^{-1} \left(\frac{0,61 + 0,61}{3,81} \right) = 0,759 \text{ m}$$

3. Cálculo de δ_t

$$\delta_t = \frac{0,759}{0,61} = 1,244 \text{ rad}$$

4. Cálculo de δ_{L_2}

$$\delta_{L_2} = \frac{0,759}{2 \cdot 0,61} = 0,622 \text{ rad}$$

5. Cálculo de β

$$\beta = \sin^{-1} \frac{0,61}{\sqrt{3,81^2 + 0,61^2 - 2(0,61 \cdot 3,81) \cdot \cos(0,622)}}$$

$$\beta = 0,184 \text{ rad}$$

6. Cálculo de P_{2-L_2}

$$P_{2-L_2} = \frac{2(0,184)}{\pi} = 0,117$$

Orificio en la mitad del segmento L_1 (Fig. G-11b)

7. Cálculo de λ

Se calcula geoméricamente (véase la Fig. G-11b)

$$\lambda = 0,17 \text{ rad}$$

8. Cálculo de P_{2-L_1}

$$P_{2-L_1} = \frac{0,17}{\pi} = 0,054$$

Factor de reducción q

9. Por lo tanto:

$$q = \frac{0,054}{0,117} = 0,462$$

G.3.2. Caso 12: $r = 18$ in, $R = 18$ in, $d = 118,11$ in

Tabla G-12. Datos de las tuberías paralelas del caso 12.

Tubería fuente	Tubería objetivo	Distancia
$r = 18$ in = 0,457 m	$R = 18$ in = 0,457 m	$d = 118,11$ in = 3 m

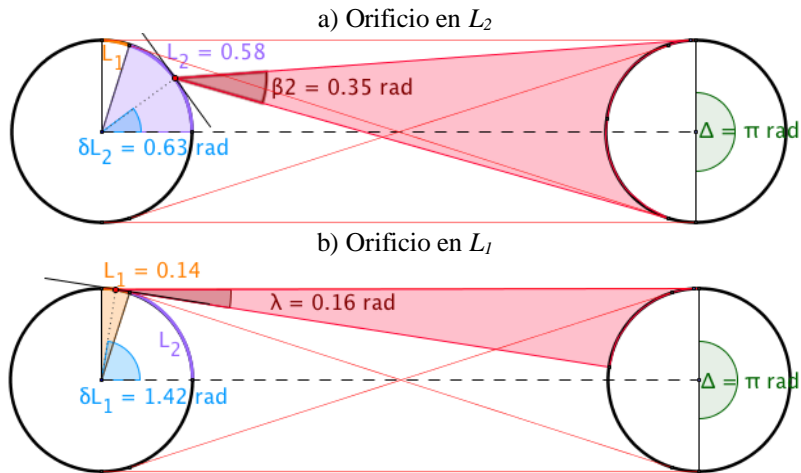


Fig. G-12. Diagrama de las tuberías paralelas del caso 12.

1. Calculando Δ

$$\Delta = 2 \left(\pi - \cos^{-1} \left(\frac{0,457 - 0,457}{3} \right) \right) = 3,142 \text{ rad}$$

Orificio en la mitad del segmento L_2 (Fig. G-12a)

2. Cálculo de L_2

$$L_2 = 0,457 \cdot \cos^{-1} \left(\frac{0,457 + 0,457}{3} \right) = 0,576 \text{ m}$$

3. Cálculo de δ_t

$$\delta_t = \frac{0,576}{0,457} = 1,26 \text{ rad}$$

4. Cálculo de δ_{L_2}

$$\delta_{L_2} = \frac{0,576}{2 \cdot 0,457} = 0,63 \text{ rad}$$

5. Cálculo de β

$$\beta = \sin^{-1} \frac{0,457}{\sqrt{3^2 + 0,457^2 - 2(0,457 \cdot 3) \cdot \cos(0,63)}}$$

$$\beta = 0,174 \text{ rad}$$

6. Cálculo de P_{2-L_2}

$$P_{2-L_2} = \frac{2(0,174)}{\pi} = 0,111$$

Orificio en la mitad del segmento L_1 (Fig. G-12b)

7. Cálculo de λ

Se calcula geoméricamente (véase la Fig. G-12b)

$$\lambda = 0,16 \text{ rad}$$

8. Cálculo de P_{2-L_1}

$$P_{2-L_1} = \frac{0,16}{\pi} = 0,051$$

Factor de reducción q

9. Por lo tanto:

$$q = \frac{0,051}{0,111} = 0,459$$

G.3.3. Caso 13: $r = 12$ in, $R = 12$ in, $d = 100$ in

Tabla G-13. Datos de las tuberías paralelas del caso 13.

Tubería fuente	Tubería objetivo	Distancia
$r = 12$ in = 0,305 m	$R = 12$ in = 0,305 m	$d = 100$ in = 2,54 m

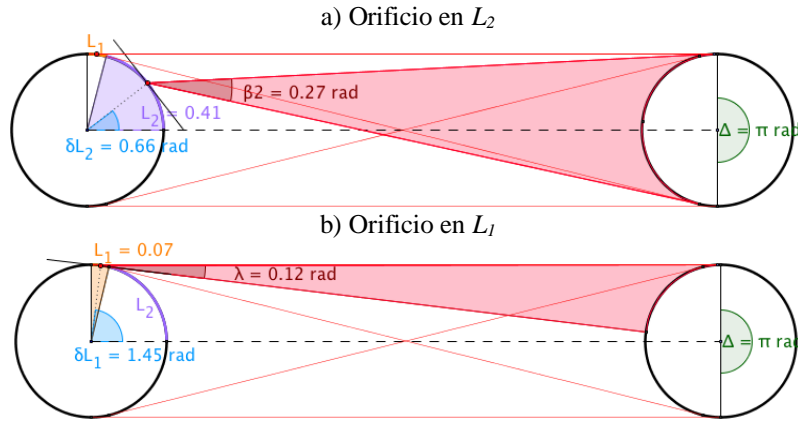


Fig. G-13. Diagrama de las tuberías paralelas del caso 13.

1. Calculando Δ

$$\Delta = 2 \left(\pi - \cos^{-1} \left(\frac{0,305 - 0,305}{2,54} \right) \right) = 3,142 \text{ rad}$$

Orificio en la mitad del segmento L_2 (Fig. G-13a)

2. Cálculo de L_2

$$L_2 = 0,305 \cdot \cos^{-1} \left(\frac{0,305 + 0,305}{2,54} \right) = 0,405 \text{ m}$$

3. Cálculo de δ_t

$$\delta_t = \frac{0,405}{0,305} = 1,328 \text{ rad}$$

4. Cálculo de δ_{L_2}

$$\delta_{L_2} = \frac{0,405}{2 \cdot 0,305} = 0,664 \text{ rad}$$

5. Cálculo de β

$$\beta = \sin^{-1} \frac{0,305}{\sqrt{2,54^2 + 0,305^2 - 2(0,305 \cdot 2,54) \cdot \cos(0,664)}}$$

$$\beta = 0,133 \text{ rad}$$

6. Cálculo de P_{2-L_2}

$$P_{2-L_2} = \frac{2(0,133)}{\pi} = 0,085$$

Orificio en la mitad del segmento L_1 (Fig. G-13b)

7. Cálculo de λ

Se calcula geoméricamente (véase la Fig. G-13b)

$$\lambda = 0,12 \text{ rad}$$

8. Cálculo de P_{2-L_1}

$$P_{2-L_1} = \frac{0,12}{\pi} = 0,038$$

Factor de reducción q

9. Por lo tanto:

$$q = \frac{0,038}{0,085} = 0,447$$

G.3.4. Caso 14: $r = 6$ in, $R = 6$ in, $d = 78,74$ in

Tabla G-14. Datos de las tuberías paralelas del caso 14.

Tubería fuente	Tubería objetivo	Distancia
$r = 6$ in = 0,152 m	$R = 6$ in = 0,152 m	$d = 78,74$ in = 2 m

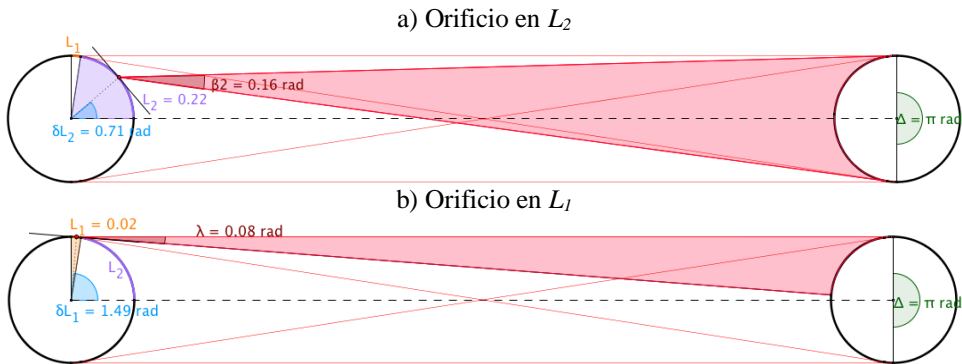


Fig. G-14. Diagrama de las tuberías paralelas del caso 14.

1. Calculando Δ

$$\Delta = 2 \left(\pi - \cos^{-1} \left(\frac{0,152 - 0,152}{2} \right) \right) = 3,142 \text{ rad}$$

Orificio en la mitad del segmento L_2 (Fig. G-14a)

2. Cálculo de L_2

$$L_2 = 0,152 \cdot \cos^{-1} \left(\frac{0,152 + 0,152}{2} \right) = 0,216 \text{ m}$$

3. Cálculo de δ_t

$$\delta_t = \frac{0,216}{0,152} = 1,421 \text{ rad}$$

4. Cálculo de δ_{L_2}

$$\delta_{L_2} = \frac{0,216}{2 \cdot 0,152} = 0,711 \text{ rad}$$

5. Cálculo de β

$$\beta = \sin^{-1} \frac{0,152}{\sqrt{2^2 + 0,152^2 - 2(0,152 \cdot 2) \cdot \cos(0,711)}}$$

$$\beta = 0,081 \text{ rad}$$

6. Cálculo de P_{2-L_2}

$$P_{2-L_2} = \frac{2(0,081)}{\pi} = 0,052$$

Orificio en la mitad del segmento L_1 (Fig. G-14b)

7. Cálculo de λ

Se calcula geoméricamente (véase la Fig. G-14b)

$$\lambda = 0,08 \text{ rad}$$

8. Cálculo de P_{2-L_1}

$$P_{2-L_1} = \frac{0,08}{\pi} = 0,025$$

Factor de reducción q

9. Por lo tanto:

$$q = \frac{0,025}{0,052} = 0,481$$

G.3.5. Caso 15: $r = 3$ in, $R = 3$ in, $d = 57$ in

Tabla G-15. Datos de las tuberías paralelas del caso 15.

Tubería fuente	Tubería objetivo	Distancia
$r = 3$ in = 0,076 m	$R = 3$ in = 0,076 m	$d = 57$ in = 1,448 m

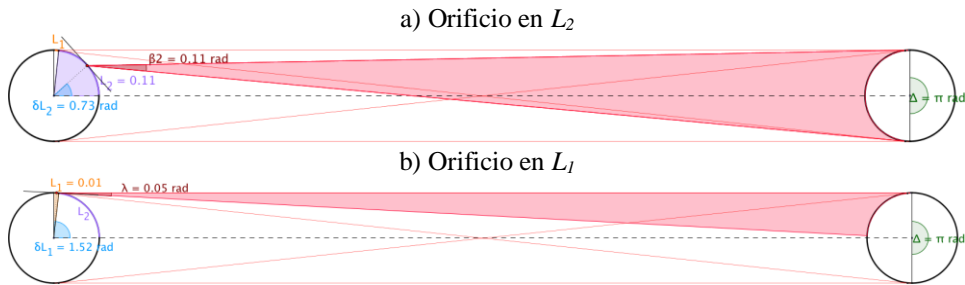


Fig. G-15. Diagrama de las tuberías paralelas del caso 15.

1. Calculando Δ

$$\Delta = 2 \left(\pi - \cos^{-1} \left(\frac{0,076 - 0,076}{1,448} \right) \right) = 3,142 \text{ rad}$$

Orificio en la mitad del segmento L_2 (Fig. G-15a)

2. Cálculo de L_2

$$L_2 = 0,076 \cdot \cos^{-1} \left(\frac{0,076 + 0,076}{1,448} \right) = 0,111 \text{ m}$$

3. Cálculo de δ_t

$$\delta_t = \frac{0,111}{0,076} = 1,461 \text{ rad}$$

4. Cálculo de δ_{L_2}

$$\delta_{L_2} = \frac{0,111}{2 \cdot 0,076} = 0,73 \text{ rad}$$

5. Cálculo de β

$$\beta = \sin^{-1} \frac{0,076}{\sqrt{1,448^2 + 0,076^2 - 2(0,076 \cdot 1,448) \cdot \cos(0,73)}}$$

$$\beta = 0,055 \text{ rad}$$

6. Cálculo de P_{2-L_2}

$$P_{2-L_2} = \frac{2(0,055)}{\pi} = 0,035$$

Orificio en la mitad del segmento L_1 (Fig. G-15b)

7. Cálculo de λ

Se calcula geoméricamente (véase la Fig. G-15b)

$$\lambda = 0,05 \text{ rad}$$

8. Cálculo de P_{2-L_1}

$$P_{2-L_1} = \frac{0,05}{\pi} = 0,016$$

Factor de reducción q

9. Por lo tanto:

$$q = \frac{0,016}{0,035} = 0,457$$

VALORES DEL FACTOR DE REDUCCIÓN «q» PARA LAS CONFIGURACIONES REALES DE TUBERÍAS ENCONTRADAS EN LA LITERATURA Y EN OTROS ARREGLOS.

	Caso	Tubería fuente		Tubería objetivo		Distancia		Parámetros del modelo								
		r (in)	r (m)	R (in)	R (m)	d (in)	d (m)	Δ (rad)	L_2 (m)	δ_r (rad)	δ_{L2} (rad)	β (rad)	P_{2-L2}	λ (rad)	P_{2-L1}	q
r < R	1	12	0,305	18	0,457	50	1,27	3,382	0,283	0,928	0,464	0,471	0,3	0,4	0,127	0,423
	2	4	0,102	9	0,229	15	0,381	3,821	0,052	0,52	0,26	0,94	0,598	0,78	0,248	0,415
	3	3	0,076	4	0,102	14,68	0,373	3,281	0,082	1,079	0,539	0,335	0,213	0,29	0,092	0,432
	4	12	0,305	24	0,61	80	2,032	3,443	0,337	1,105	0,552	0,35	0,223	0,32	0,102	0,457
	5	18	0,457	24	0,61	100	2,54	3,262	0,52	1,138	0,569	0,285	0,181	0,25	0,08	0,442
r > R	6	24	0,61	18	0,457	150	3,81	3,061	0,785	1,287	0,643	0,137	0,087	0,12	0,038	0,437
	7	21	0,533	18	0,457	393,7	10	3,126	0,784	1,471	0,735	0,048	0,031	0,05	0,016	0,516
	8	15	0,381	12	0,305	267	6,782	3,119	0,56	1,47	0,735	0,047	0,03	0,04	0,013	0,433
	9	12	0,305	9	0,229	312	7,925	3,122	0,459	1,505	0,752	0,03	0,019	0,03	0,01	0,526
	10	8	0,203	3,31	0,084	129,4	3,287	3,069	0,301	1,483	0,741	0,027	0,017	0,03	0,01	0,528
r = R	11	24	0,61	24	0,61	150	3,81	3,142	0,759	1,244	0,622	0,184	0,117	0,17	0,054	0,462
	12	18	0,457	18	0,457	118,1	3	3,142	0,576	1,26	0,63	0,174	0,111	0,16	0,051	0,459
	13	12	0,305	12	0,305	100	2,54	3,142	0,405	1,328	0,664	0,133	0,085	0,12	0,038	0,447
	14	6	0,152	6	0,152	78,74	2	3,142	0,216	1,421	0,711	0,081	0,052	0,08	0,025	0,481
	15	3	0,076	3	0,076	57	1,448	3,142	0,111	1,461	0,73	0,055	0,035	0,05	0,016	0,457

La relación entre P_{2-L_1} y P_{2-L_2} para cada uno de los ejemplos analizados da un valor medio de q de **0,45**.

