01 SEGURIDAD principios ok 20/8/08 10:14 Página i

01 SEGURIDAD principios ok 20/8/08 10:14 Página ii

01 SEGURIDAD principios ok 20/8/08 10:14 Página iii

SEGURIDAD INDUSTRIAL EN PLANTAS QUÍMICAS Y ENERGÉTICAS

Fundamentos, evaluación de riesgos y diseño

01 SEGURIDAD principios ok 20/8/08 10:14 Página iv

01 SEGURIDAD principios ok 20/8/08 10:14 Página v

J. M.ª STORCH DE GRACIA
y
T. GARCÍA MARTÍN

SEGURIDAD INDUSTRIAL EN PLANTAS QUÍMICAS Y ENERGÉTICAS

Fundamentos, evaluación de riesgos y diseño

DIAZ DE SANTOS

01 SEGURIDAD principios ok 20/8/08 10:14 Página vi

© José M.ª Storch de Gracia y Tomás García Martín, 2008

Reservados todos los derechos.

«No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico por fotocopia, por registro u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del Copyright.»

Ediciones Díaz de Santos, S. A.

Internet: http://www.diazdesantos.es
E-mail: ediciones@diazdesantos.es

ISBN: 978-84-7978-864-3
Depósito legal: M. 40.162-2008

Diseño de cubierta: Ángel Calvete
Fotocomposición: Fer Fotocomposición, S. A.
Impresión: Edigrafos, S. A.
Encuadernación: Rústica

Printed in Spain - Impreso en España

01 SEGURIDAD principios ok 20/8/08 10:14 Página vii

A nuestras familias
A nuestros amigos

01 SEGURIDAD principios ok 20/8/08 10:14 Página viii

01 SEGURIDAD principios ok 20/8/08 10:14 Página ix

«TODA TINIEBLA PUEDE ILUMINARSE:

1. Lo desconocido es cognoscible.
2. Progreso por tanteo y error.
3. La medida y la teoría son inseparables.
4. La analogía da inspiración.
5. Nuevas verdades conectan con viejas verdades.
6. Complementariedad evita contradicción.
7. Las grandes consecuencias surgen de pequeñas causas.»

J. A. Wheeler: *"Siete oráculos: ayuda en la búsqueda de la Verdad*

"SAFETY FIRST"

... que los fenómenos de oxidación viva integran un campo en el que el investigador no corre el riesgo de enfrentarse con la monotonía... la diversidad de los fenómenos, que lo hacen un tanto enigmático, impulsan a todo cerebro lúcido a una estimación justa de la limitación de sus medios y a una admiración grande por la comunidad científica que contribuye a la obra, inmensa y siempre inconclusa, del descubrimiento.

A. Van Tiggelen

01 SEGURIDAD principios ok 20/8/08 10:14 Página x

01 SEGURIDAD principios ok 20/8/08 10:14 Página xi

Prólogo

Las industrias químicas y energéticas manejan productos y utilizan presiones y temperaturas que exigen la adopción de estrictas medidas de seguridad para reducir o anular la peligrosidad en el manejo de estas instalaciones. Por otra parte, los grandes procesos de refino y petroquímica que fueron descubriéndose a lo largo del siglo XX han evolucionado debido a los progresos realizados en los materiales, las máquinas y la instrumentación. Los materiales son capaces de trabajar en condiciones cada vez más severas de temperatura, presión y resistencia química, las máquinas son más potentes, más veloces, con mejores rendimientos y más fiables, y los progresos de la electrónica han conducido a una automatización cada vez más sofisticada de los procesos productivos que otorgan a las unidades una mayor versatilidad.

Esta evolución ha sido asociada a la implantación de sistemas de seguridad cada vez más perfeccionados, de manera tal que se ha conseguido que el número de accidentes producidos en estas industrias sea muy bajo en comparación con los producidos en la industria en general.

Desgraciadamente, es imposible alcanzar la seguridad absoluta, produciéndose periódicamente accidentes incluso en instalaciones de empresas tecnológicamente de vanguardia ubicadas en países que se encuentran a su vez a la cabeza de la tecnología. Por añadidura, alguno de estos accidentes ha ocasionado pérdidas humanas y materiales importantes, lo que unido a su espectacularidad, ha contribuido a crear la imagen de que la industria química es más peligrosa y contaminante que otras, lo que no es cierto si se analizan las series históricas.

Esta imagen negativa de la industria química ha llegado a tales extremos que hoy es casi imposible encontrar nuevos emplazamientos para la ubicación de este tipo de plantas en países desarrollados, en contraste con lo que sucedía hace varias décadas en las que las corporaciones regionales y locales pugnaban por atraer inversiones en este campo. A estos efectos es paradigmático lo que ocurre con la posible ubicación de una refinería de petróleo en Extremadura. Haciendo abstracción de que esta ubicación no parece la más adecuada por su lejanía de la costa y de los grandes centros de consumo, es difícil comprender la oposición social a esta instalación en una región muy necesitada de inversiones industriales y poco desarrollada en comparación con la

01 SEGURIDAD principios ok 20/8/08 10:14 Página xii

media de España. Las nueve refinerías existentes en nuestro país han demostrado, por una parte, un excelente comportamiento en materia de seguridad y medio ambiente y, por otra, algunas de ellas han contribuido a generar un importante tejido industrial en lugares tales como Puertollano, Huelva, Algeciras o Tarragona.

El alto nivel alcanzado en la seguridad de las plantas químicas tiene, en primer lugar, fundamentos técnicos: adecuada distribución física de las unidades, diseño correcto de los equipos y los servicios, buen mantenimiento preventivo y correctivo y adecuadas normas operativas de las plantas.

Pero junto a estos aspectos hay otros muy relevantes, en especial la motivación de la organización a todos los niveles en materia de seguridad. Es necesario que todo el personal esté mentalizado sobre la trascendencia económica y social de los accidentes y que extreme el respeto a las normas existentes. La mayoría de los accidentes se inician por un error humano y son, por tanto, evitables. En esta línea, hay tres campos en los que debe actuarse:

En primer lugar, a través de los comités de seguridad de alto nivel y de nivel operativo. Tuve la ocasión de presidir durante varios años el Comité de Alta Dirección de Seguridad y Medio Ambiente de Repsol, y puedo certificar la importancia de su correcto funcionamiento a efectos tanto prácticos como simbólicos. En este Comité, del que formaban parte los primeros ejecutivos de las distintas empresas y líneas de negocio del grupo, se analizaba la estrategia de actuación que se transmitía al Comité operativo y, a través de éste, a toda la organización.

En segundo lugar, se precisa actuar de manera eficaz en la mentalización de todo el personal en materia de seguridad y dedicar todo el tiempo que sea necesario a esta función. La seguridad no es solamente responsabilidad de los departamentos a los que se asigna esta función. Todos los puestos de trabajo son corresponsables de la seguridad industrial, constituyendo esta tarea una parte esencial de su trabajo. A estos efectos, debe tenerse la certeza de que todo incidente que se produzca, aunque no ocasione un accidente, ha sido reportado y analizado, adoptando las medidas precisas para que no vuelva a producirse. Está comprobado que los índices de siniestralidad son inversamente proporcionales a las horas dedicadas por la organización al estudio de los fallos habidos y las mejoras permanentes de las prácticas operativas. No es aceptable ni el desconocimiento de las normas ni la negligencia en su aplicación.

En tercer lugar, son imprescindibles auditorías externas e internas de los sistemas de seguridad. La plantilla debe acoger estas auditorías como una ayuda que permita conocer las deficiencias y subsanarlas. Estas deficiencias se refieren no sólo al estado de los equipos y a la adecuación de los reglamentos de seguridad, sino también a la preparación y mentalización del personal y al grado de cumplimiento de las normas.

Hechas las anteriores consideraciones, me referiré a continuación a los autores del presente Manual. José María Storch de Gracia es doctor en Química

01 SEGURIDAD principios ok 20/8/08 10:14 Página xiii

Industrial por la Universidad Complutense de Madrid (1981). Ha sido director general de Proquímica S.A. (1985-1994) y de Eisa (1995), presidente desde 1995 de la Asociación Nacional de Normalización de Bienes de Equipo y Seguridad Industrial (Bequinor), habiendo participado en la elaboración de diferentes reglamentos oficiales de seguridad. Es profesor agregado de la Universidad Alfonso X El Sabio de Madrid. Tomás García Martín es igualmente doctor en Química Industrial por la Universidad Complutense de Madrid (1995) y tiene una amplia experiencia investigadora en España y en Gran Bretaña. Actualmente es jefe de estudios de Ingeniería Química y Ciencias Ambientales de la Universidad Alfonso X El Sabio. La formación teórica y práctica de los autores ha permitido que en este Manual se aborden las materias que deben conocer los profesionales de las industrias químicas y energéticas en materia de seguridad, y se hace de manera sistemática, rigurosa y amena, lo cual constituye un mérito adicional en este tipo de publicaciones. Los autores han sabido conciliar su excelente formación teórica con su dilatada experiencia en seguridad industrial.

El Manual se estructura en tres partes. En la Parte I se describen los Fundamentos de la Seguridad Industrial Química: bases físico-químicas de los accidentes y de la extinción, gestión de la seguridad y legislación. Se complementa con una amplia descripción de la tipología de los accidentes (fugas, incendios, explosiones), estadísticas y bancos de datos.

La Parte II se refiere al análisis de evaluación de riesgos. En ella se describen los métodos cualitativos, semicuantitativos y cuantitativos para el análisis de riesgos. Estos métodos son de gran utilidad no sólo para las empresas químicas que deben aplicarlos con un alto nivel de exigencia, sino también para las empresas aseguradoras que periódicamente valoran el funcionamiento de los sistemas de seguridad y califican estos en su globalidad y parcialmente. Finaliza esta parte con el análisis de los criterios que pueden elegirse para la identificación y evaluación de riesgos.

En la Parte III se analiza el diseño de las plantas desde el punto de vista de la seguridad industrial. Es evidente que la seguridad es, por exigencias legales y por razones prácticas, un aspecto esencial en la concepción de las plantas químicas, tanto en la que se refiere a la disposición física de las unidades y servicios como al diseño del proceso, a la protección de los sistemas eléctricos y de control, a los sistemas de defensa contra incendios y explosiones y a los medios de protección pasiva de las unidades y equipos de proceso y de las instalaciones de almacenamiento de materias primas y productos.

Son interesantes las reflexiones que se hacen en su Parte I sobre la motivación del personal, el estímulo de las acciones favorables a la seguridad y el desincentivo de las desfavorables. Insisto en este punto, muy bien tratado en el Manual, porque, como he dicho anteriormente, la mayor parte de los accidentes se deben a errores de personal por negligencia o por imprudencia.

Concluyo reafirmando lo que decía Alfonso Enseñat en el Prólogo de la versión anterior de este Manual: «En definitiva, nos encontramos ante un trabajo

01 SEGURIDAD principios ok 20/8/08 10:14 Página xiv

muy serio y muy valioso, e incluso me atrevería a decir que insustituible, para quienes tienen la responsabilidad de mejorar el nivel de seguridad de nuestros establecimientos e instalaciones industriales químicas y petroleras».

José Luis Díaz Fernández

Ex-Presidente de Empetrol, Petroliber, Campsa, CLH y Repsol Petróleo.

01 SEGURIDAD principios ok 4/9/08 07:47 Página xv

Introducción

La intención, el contexto industrial y el contenido del libro presente han quedado expuestos en el prólogo excelente, que agradecemos, del Prof. Dr. D. José Luis Díaz Fernández, que es una de las personalidades en la cumbre de la industria española.

En esta versión de la obra se han añadido algunos temas de interés: riesgos derivados de las reacciones químicas, toxicología para técnicos. También se han incluido actualizaciones debidas a la evolución de las reglamentaciones: prevención de accidentes graves (Seveso); recipientes a presión; protección de sistemas eléctricos (ATEX); defensa contra incendios de establecimientos industriales (RSCIEI); prevención de riesgos laborales, etc.

Solamente nos queda añadir el capítulo de agradecimientos que, en una obra de este tipo, suele ser amplio. A los referidos en la versión anterior de la obra, se debe añadir, entre otros: D.ª Rosa Sánchez Torres, directora de Bequinor; D. Francisco Domingo de CESIF; D. José Pina y D.ª Mercedes Cascales del ISE (Instituto Superior de la Energía); D. Joaquín Vioque de la Editorial Díaz de Santos; D. Xavier Baraza de Derivados Químicos. Todos ellos han contribuido, de unas formas u otras, a la obra presente. También deseamos tener un recuerdo agradecido para más de 6.000 personas que adquirieron los ejemplares de la versión anterior, esperando que les haya resultado de utilidad en su vida profesional. Algunos nos hicieron llegar comentarios, por lo que merecen agradecimiento doble.

Los autores

01 SEGURIDAD principios ok 20/8/08 10:14 Página xvi

01 SEGURIDAD principios ok 20/8/08 10:14 Página xvii

Índice

PRIMERA PARTE
BASES Y FUNDAMENTOS DE LA SEGURIDAD INDUSTRIAL QUÍMICA

CAPÍTULO 1. ACCIDENTES: TIPOS, ESTADÍSTICAS Y BANCOS DE DATOS

1.1. Tipología de accidentes 4
1.1.1. Fugas: escapes y derrames 4
1.1.2. Incendios: 4
a) Incendio de líquido en disposición abierta (de charco/*pool fire*) 7
b) Incendio de líquido con rebosamientos violentos (*boil-over* y *slop-over*) 7
c) Incendio de gases o vapores en nube abierta (bola de fuego/*fireball*) . . 7
d) De gases o vapores en fuga local presurizada (dardo/*jet fire*) 8
1.1.3. Explosiones: 8
a) Explosiones iniciadoras de fugas 9
b) Explosiones como consecuencia de fugas 12
c) Explosiones como consecuencia de incendios 13
d) Explosiones como consecuencia de otras explosiones 13
1.2. Estadísticas de accidentes 14
1.3. Bancos de datos 18
1.4. Estudio de accidentes 20

CAPITULO 2. QUÍMICA, FÍSICA E INGENIERÍA DE LOS ACCIDENTES Y DE LA EXTINCIÓN

EMISIONES, INCENDIOS Y EXPLOSIONES ***24***

2.1. Definiciones y conceptos básicos 24
2.1.1. Conceptos básicos 24
2.1.2. Definiciones según Normas UNE 41
2.1.3. Otras definiciones 51
2.2. Explosiones con efecto BLEVE 54
2.3. Fisicoquímica del fuego y de las explosiones 58
2.3.1. Inflamación e ignición por reacciones en cadena 61

01 SEGURIDAD principios ok 20/8/08 10:14 Página xviii

2.3.2. Ignición térmica. Condiciones de ignición 66
2.3.3. Influencia del entorno sobre el fuego y las explosiones 69
2.3.4. Incendios de sólidos en recintos cerrados 71
2.4. Fisicoquímica de la extincion de incendios y explosiones 73
2.4.1. Extinción por enfriamiento 73
2.4.2. Extinción por retirada y/o dilución de oxígeno: sofocación 74
2.4.3. Extinción por eliminación de combustible 74
2.4.4. Extinción por inhibición de la llama 74
2.5. Emisiones inflamables o tóxicas 75
2.5.1. Emisiones de gases o vapores 75
a) Modelo general según API basado en la ecuación de Sutton 76
b) Modelo de Pasquill 79
c) Consideraciones relativas al riesgo de incendio 83
2.5.2. Emisiones de líquidos y nieblas 84
2.5.3. Dos casos resueltos 84
2.6. Cuantificacion y alcance de las consecuencias 89
2.6.1. Emisiones tóxicas y/o inflamables 93
2.6.2. Incendios 93
2.6.3. Explosiones 95
a) Explosiones deflagrantes confinadas: cuantificación de sus efectos . . 96
b) Explosiones detonantes no confinadas: cuantificación de efecto y alcance 100

RIESGOS ORIGINADOS POR LAS REACCIONES QUÍMICAS ***102***

2.7. Reacciones químicas indeseadas y su caracterización 102
2.8. Autodescomposición de reactantes y productos 103
2.9. Reacciones con el agua 106
2.10. Reacciones con el aire 107
2.11. Reacciones descontroladas 107
2.11.1. Aproximaciones teóricas: el balance de calor 113
2.11.2. Caracterización secuencial de los sistemas reactivos 120
a) Objetivos y variables importantes 123
b) Estimaciones preliminares de gabinete 130
c) Experimentación preliminar 135
d) Caracterización experimental de la reacción normal 136
e) Resultados de las calorimetrías 138
f) Caracterización experimental de la reacción descontrolada 141
2.11.3. Métodos y dispositivos experimentales 144
a) Tamaño de muestra 144
b) Modos de funcionamiento 144
c) Utilidad 147
d) Calor 147

01 SEGURIDAD principios ok 20/8/08 10:14 Página xix

e) Agitación 147
f) Información que proporcionan 147
g) Selección de valorímetros 149
2.11.4. Diseño de proceso seguro para reactores tipo tanque agitado 151
a) Diseño del proceso 152
b) Diseño del equipo: el reactor tipo tanque agitado 158
c) Diseño de equipo de nueva planta y dedicado 159
d) Diseño de proceso con equipo multiproceso existente 161
e) Diseño de las refrigeraciones 163
f) Cambio de escala 164
g) Seguridad y seguridades 167

TOXICOLOGÍA INDUSTRIAL ***170***

2.12. Introducción 170
2.13. Sustancias nocivas, tóxicas y toxinas: definiciones y clasificaciones 173
2.14. Efectos sobre individuos diversos 175
2.15. Cuantificaciones: dosis-efecto y dosis-respuesta 176
2.16. Expresiones para las dosis: límites, umbrales, etc. 177
a) Valores absolutos 177
b) Valores referidos a tiempos de exposición 178
c) Valores medios ponderados en el tiempo 179
2.17. Datos toxicológicos y sus fuentes 181
2.18. Prevención y protección 189
2.18.1. Ventilación 189
2.18.2. Reconocimientos médicos al personal 189
2.18.3. Equipo para protección individual (EPI) 189
2.18.4. Sustitución de sustancias peligrosas 189
2.18.5. Higiene personal 190
2.18.6. Muestreos, análisis y alarmas en el entorno de trabajo 190
2.18.7. Primeros auxilios e información adecuada al personal sanitario en caso de accidente 190
2.19. Reglamentaciones 191
2.20. Unidades 191

CAPÍTULO 3. GESTIÓN DE LA SEGURIDAD EN LAS INDUSTRIAS QUÍMICAS Y ENERGÉTICAS

3.1. Seguridad industrial y gestión de la empresa 193
3.1.1. Introducción 194
3.1.2. Seguridad y diseño 196
3.1.3. Seguridad en la construcción de las instalaciones 199

01 SEGURIDAD principios ok 20/8/08 10:14 Página xx

3.1.4. Seguridad en la operación 200
3.1.5. Mantenimiento y seguridad 203
3.1.6. Prevención y actuación frente a siniestros 207
3.1.7. Responsabilidad y aseguramiento 211
3.1.8. Seguridad industrial y gestión general de la empresa 212
3.1.9. Colofón 215
3.2. La recomendación API-RP-750: «Gestión de riesgos en procesos» 217
3.3. Gestión de la seguridad: una función del director del proyecto 217
3.3.1. Seguridad y equipos humanos en los proyectos de ingeniería y construcción 218
3.3.2. Seguridad en la ingeniería de diseño 222
3.3.3. Seguridad en los acopios 227
3.3.4. Seguridad en la construcción 228
3.3.5. Seguridad en la entrega, puesta en marcha y operación 231

CAPÍTULO 4. LEGISLACIÓN PARA LA SEGURIDAD INDUSTRIAL

4.1. Introducción 233
4.2. Panorama legislativo 233
4.3. Guía para navegantes 236
4.4. Índices de disposiciones legales 236
Bibliografía de la Primera Parte 313

SEGUNDA PARTE
ESTUDIOS PARA ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE RIESGOS

CAPÍTULO 5. INTRODUCCIÓN Y GENERALIDADES

5.1. Términos y siglas 329
5.2. Obligaciones legales relacionadas con los estudios de riesgos 347
5.2.1. El reglamento para control de riesgos 349
5.2.2. La directriz básica 366
5.2.3. Autoprotección 374
5.2.4. Información básica (IBA) para la elaboración de planes de emergencia exterior (PEE) 379
5.2.5. Análisis del riesgo 388
5.2.6. Formatos de notificación de accidentes 391
5.2.7. Análisis de consecuencias para el PEE 392
5.3. Conceptos estadísticos y probabilísticos en los estudios de riesgos 395
5.4. Equipo profesional para análisis y evaluación de riesgos 400
5.5. Documentación requerida y medios informáticos auxiliares 401

01 SEGURIDAD principios ok 20/8/08 10:14 Página xxi

5.6. Documentación resultante 405
5.7. Riesgos a considerar en los estudios 406
5.8. Planteamiento generalde los estudios de riesgos 407

CAPÍTULO 6. MÉTODOS CUALITATIVOS PARA EL ANÁLISIS DE RIESGOS

6.1. Análisis histórico de riesgos (AHR) 416
6.2. Análisis preliminar de riesgos (APR/PHA) 418
6.3. Análisis «¿qué pasa si...?» (QPS/WHAT IF...?) 421
6.4. Análisis mediante listas de comprobación (LC/CHECK LIST) 423
6.5. Análisis de los modos de fallos y sus efectos (AMFE/FMEA) 425
6.6. Análisis funcional de operabilidad (AFO/HAZOP) 428
6.7. Análisis cualitativo mediante árboles de fallos (AAF/FTA) 435
6.8. Análisis cualitativo mediante árboles de sucesos (AAS/ETA) 446
6.9. Análisis de causas y consecuencias (ACC) 450

CAPÍTULO 7. MÉTODOS SEMICUANTITATIVOS PARA EL ANÁLISIS DE RIESGOS

7.1. Análisis de riesgos con evaluación del riesgo intrínseco 453
7.2. Análisis de los modos de fallo, efectos y criticidad (AMFEC/FMEAC) 465
7.3. Método de DOW: índice de fuego (o incendio) y explosión (IFE ó IIE/FEI) 471
7.4. Método de ICI: índices de MOND 483
7.5. Método de UCSIP 491

CAPÍTULO 8. MÉTODOS CUANTITATIVOS PARA EL ANÁLISIS DE RIESGOS

8.1. Análisis cuantitativo mediante árboles de fallos (ACAF/FTA) 496
8.2. Análisis cuantitativo mediante árboles de sucesos (ACAS/ETA) 504
8.3. Análisis cuantitativo de causas y consecuencias (ACCC) 507
8.4. Datos para los métodos cuantitativos 508
8.4.1. Tipología de los componentes 509
8.4.2. Tipología de los fallos o averías 511
8.4.3. Expresión de los datos 514
8.4.4. Fuentes de datos y reglas orientativas 517
8.4.5. Bancos de datos 521
8.4.6. Ejemplos 521
8.4.7. Variación con el tiempo o con el uso 521
8.4.8. Fallos en modo común 529

01 SEGURIDAD principios ok 24/9/08 16:29 Página xxii

CAPÍTULO 9. DETERMINACIÓN DE RIESGOS PARA EL ENTORNO

9.1 Método de la vulnerabilidad del entorno: factor de vulnerabilidad 532
9.2. Relación entre intensidades en los destinos y severidad. Método Probit 533
9.3. Riesgos individuales. Curvas isorriesgo 538
9.4. Riesgos colectivos. Curvas F-N 542
9.5. Otros índices de riesgo 548
9.6. Percepción psicológica de los riesgos 550
9.7. Criterios de aceptabilidad 554

CAPÍTULO 10. CRITERIOS PARA ELEGIR MÉTODOS PARA IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE RIESGOS

Bibliografía de la Segunda parte 569

TERCERA PARTE
SEGURIDAD Y DISEÑO

CAPÍTULO 11. INTRODUCCIÓN

11.1. Consideraciones iniciales previas al diseño 577

CAPÍTULO 12. SEGURIDAD, EMPLAZAMIENTO Y DISTRIBUCIÓN DE PLANTA

CAPÍTULO 13. SEGURIDAD EN EL DISEÑO DE PROCESO

13.1. Presiones de diseño: protección frente a sobrepresiones (alivio y venteo) y vacío .. 589
13.1.1. Definiciones y terminología 594
13.1.2. Diseño de las presiones 595
13.1.3. Protección frente al vacío 601
13.2. Temperaturas de diseño: protección frente a sobrecalentamientos y frío 601
13.3. Alivios controlados para escapes eventuales de proceso y ante incendio 603
13.3.1. Criterios y cálculo para establecer la capacidad requerida 603
13.3.2. Equipo: válvulas de seguridad, válvulas P/V, discos de ruptura y apagallamas 624
13.3.3. Equipo: tuberías y colectores para recogida 629
13.3.4. Equipo: sistemas para recogida, evacuación y/o destrucción 632
13.4. Operaciones en circuitos cerrados 647
13.5. Operaciones con atmósferas inertes: barridos e inertizaciones 647

01 SEGURIDAD principios ok 20/8/08 10:14 Página xxiii

13.5.1. Criterios básicos de instalación 651
13.5.2. Tipos de gases inertes 652
13.5.3. Concentración máxima permisible de oxígeno 653
13.5.4. Fuentes de gases inertes 653
13.6. Protección mediante instrumentación 656
13.6.1. Control, alarma y anillos redundantes 656
13.6.2. Parada de emergencia 662
13.7. Fuentes de peligro y prevención por tipos de equipo 664
13.8. Seguridad inherente de los procesos 678
13.9 Diseño, fabricación y evaluación de conformidad de los equipos a presión a partir de mayo de 2002 687
13.9.1 Requisitos esenciales de seguridad 691
13.9.2. Cuadro de evaluación de la conformidad 704
13.9.3. Procedimientos de evaluación de la conformidad 708
13.9.4. Marcado «CE» y declaración de conformidad 719
13.9.5. Normas armonizadas 720

CAPÍTULO 14. PROTECCIÓN DE SISTEMAS ELÉCTRICOS

14.1. Protección para evitar la ignición de mezclas inflamables en la operación de conducciones y aparatos eléctricos por chispas o por calentamiento de los mismos 730
14.1.1. Protección según el «código IP»: restricción de penetraciones mediante envolventes 730
14.1.2. Caracterización de los riesgos por formación de atmósferas inflamables 731
14.1.3. Caracterización de las protecciones 740
14.1.4. Asignación de los modos de protección según las zonas de riesgo 746
14.1.5. Protección frente a calentamientos indebidos 747
14.1.6. Marcado de los aparatos 747
14.2. Protección frente a la electricidad estática como fuente de inflamación 749
14.3. Protección frente a descargas atmosféricas 759
14.4. Protección frente a corrientes eléctricas errantes 759
14.5. Protección frente al riesgo de electrocución 760

CAPÍTULO 15. SISTEMAS PARA DEFENSA CONTRA INCENDIOS

15.1. Clasificaciones 764
15.2. Acciones extintoras 765
15.3. Tipos de incendio 767
15.4. Idoneidad de los agentes extintores 767
15.5. Reglamentación para la defensa contra incendios 770
15.6. Características de los establecimientos industriales 772

01 SEGURIDAD principios ok 20/8/08 10:14 Página xxiv

15.6.1. Tipos de establecimientos industriales 772
15.6.2. Sectorización y cargas de fuego 772
15.6.3. Riesgo intrínseco de incendio 777
15.7. Características de los medios de protección contra incendios 778
15.8. Requisitos constructivos y dotación de medios mínimos para la protección contra incendios 779
15.8.1. Características y materiales para la defensa pasiva contra incendios . . 779
15.8.2. Dotación y requisitos de las instalaciones de protección contra incendios en los establecimientos industriales 781
15.9. Sistemas para detección y alarma de incendios 783
15.10. Diseño de sistemas fijos para la defensa contra incendios: general 787
15.11. Extinción y protección mediante agua 789
15.11.1. Bocas de incendio equipadas (BIE): en el interior del edificio 790
15.11.2. Columna seca 791
15.11.3. Columna hidrante exterior (CHE) 791
15.11.4. Monitores fijos o cañones 793
15.11.5. Cortinas de agua 794
15.11.6. Rociado 794
15.11.7. Pulverización 798
15.11.8. Nebulización 801
15.11.9. Un caso resuelto 805
15.12. Extinción y protección mediante espumas 811
15.12.1. Tipos de espumógenos y de espumas 811
15.12.2. Características y especificaciones de los espumógenos y las espumas 813
15.12.3. Elección del tipo de espumógeno 814
15.12.4. Preparación de la espuma 815
15.12.5. Aplicación 818
15.13. Fuentes de suministro y bombeo de agua 822
15.14. Extinción mediante polvo químico 826
15.14.1. Tipos de polvos extintores 826
15.14.2. Características y especificaciones 827
15.14.3. Aplicación 827
15.15. Extinción y protección mediante gases 830
15.15.1. Tipos de gases extintores 830
15.15.2. Características y especificaciones 833
15.15.3. Aplicación 833

CAPÍTULO 16. SISTEMAS PARA LA DEFENSA CONTRA EXPLOSIONES

16.1. Recipientes resistentes a las explosiones 844
16.2. Supresión de explosiones 845
16.3. Venteo de explosiones 848

01 SEGURIDAD principios ok 20/8/08 10:14 Página xxv

16.3.1. Recintos de resistencia alta 850
16.3.2. Recintos de resistencia baja 851

CAPÍTULO 17. MEDIOS DE PROTECCIÓN PASIVA

17.1. La distancia como protección 856
17.2. Contención de derrames: cubetos y bandejas 858
17.3. Conducción de derrames: drenajes y balsas 859
17.4. Muros protectores: cortafuegos y para contención y desviación de explosiones 861
17.5. Protección de elementos soportantes: calorifugado e ignifugado 862
17.6. Ventilación 865
17.7. Vías de acceso y escape 865

CAPÍTULO 18. PROTECCIÓN DE LAS UNIDADES Y EQUIPO PARA PROCESO

18.1. Protección pasiva 868
18.2. Protección en el proceso y su control 875
18.3. Protección activa 877

CAPÍTULO 19. LA NORMA ISO 13.702

CAPITULO 20. GESTIÓN DE LOS RIESGOS LABORALES

20.1. Los riesgos y su consideración 891
20.2. Actividades para la gestión de los riesgos 895
20.2.1. Estudio de accidentes pasados 898
20.2.2. Identificación y estimación de riesgos 898
20.2.3. Valoración del riesgo: ¿resulta aceptable? 900
20.2.4. Control del riesgo 900
20.3. Colofón al capítulo y al libro 908

Bibliografía de la Tercera parte 910

ÍNDICE ALFABÉTICO DE MATERIAS 935

01 SEGURIDAD principios ok 20/8/08 10:14 Página xxvi

02 SEGURIDAD Capítulo 01 21/1/08 09:03 Página 1

Primera parte

BASES Y FUNDAMENTOS DE LA SEGURIDAD INDUSTRIAL QUÍMICA

02 SEGURIDAD Capítulo 01 21/1/08 09:03 Página 2

02 SEGURIDAD Capítulo 01 21/1/08 09:03 Página 3

1

Accidentes: tipos, estadísticas y bancos de datos

Las industrias químicas y energéticas, se caracterizan por tener pocos accidentes pero, cuando se producen, de severidad (alcance y efectos) elevada. Ello se debe y da lugar a que los aspectos de seguridad tengan una importancia y sean objeto de una intensa atención en las actividades de diseño, proyecto, operación y mantenimiento de las plantas pertenecientes a dichas industrias [20].

La secuencia accidental, que se considerará con detalle más adelante y que se puede dar, de manera incompleta o total, suele ser:

a) Emisión: derrame (líquidos) o escape (gases y vapores) generalmente por pérdida de contención de los fluidos. Puede generar efectos tóxicos, incendios y/o explosiones según la naturaleza de las sustancias emitidas.
b) Incendio: combustión (de varias formas) de los fluidos contenidos o emitidos, generando radiación térmica dañina, cuando aquéllos son inflamables.
c) Explosión: anterior (por ejemplo, de aparatos) a la emisión o posterior (por aceleración de la combustión) al incendio, generando ondas de presión o de sobrepresión que son dañinas. La explosión puede también dar lugar a la propagación de proyectiles.

Tal conjunto de accidentes puede afectar a las personas, a los bienes y al medio ambiente tanto dentro como fuera de los límites de la planta en que tienen su origen aquéllos.

En el capítulo presente se van a considerar tipos y estadísticas de accidentes que pueden y suelen afectar a las industrias químicas y energéticas. También se reseñarán bancos de datos descriptivos de tales eventos. Todo ello con el fin de facilitar una visión adecuada de los problemas en sus vertientes de análisis, predicción probabilística, prevención y mitigación de los accidentes mencionados. Son muy interesantes los vídeos de las referencias [42] y [43].

02 SEGURIDAD Capítulo 01 21/1/08 09:03 Página 4

1.1. TIPOLOGÍA DE ACCIDENTES

Se va a pasar revista individual a los tipos de eventos accidentales. Una vez considerada la naturaleza individual de los mismos se deberá tener en cuenta la posibilidad de que unos den lugar a otros, en cadena o en lo que se denomina «efecto dominó».

1.1.1. Fugas: escapes y derrames

Uno de los orígenes mas frecuentes de los accidentes que nos ocupan son las fugas de substancias en forma de escapes (gases y vapores) y derrames (líquidos).

Las Figuras 1.1 [1] y 1.2 [3] muestran dos visiones relativas a las posibilidades de evolución accidental de las fugas. Tal evolución depende de:

a) Condiciones (presión, temperatura, cantidad) y estado físico del fluido fugado.
b) Naturaleza química (inflamabilidad, toxicidad).
c) Tipo de sistema de contención (equipo cerrado o abierto) en el que se origina la fuga.
d) Condiciones de entorno (geometría, topografía, meteorología) hacia el que se produce la fuga.

1.1.2. Incendios

Los incendios son reacciones de oxidación, generalmente con aire como comburente, de materias combustibles. Los efectos de estos accidentes son:

a) Calor (generalmente radiante) que produce daños de por sí y porque puede propagar la cadena accidental.
b) Humos sofocantes y/o tóxicos.
c) Onda explosiva de sobrepresión cuando se dan ciertas condiciones de aceleración de la velocidad de reacción y/o de contención. Otro efecto que puede propagar la cadena accidental.

En las instalaciones químicas y energéticas que nos ocupan los incendios pueden ocurrir de varias maneras que dependen de la naturaleza (propiedades físicas y químicas) y de la disposición del combustible.

02 SEGURIDAD Capítulo 01 21/1/08 09:03 Página 5

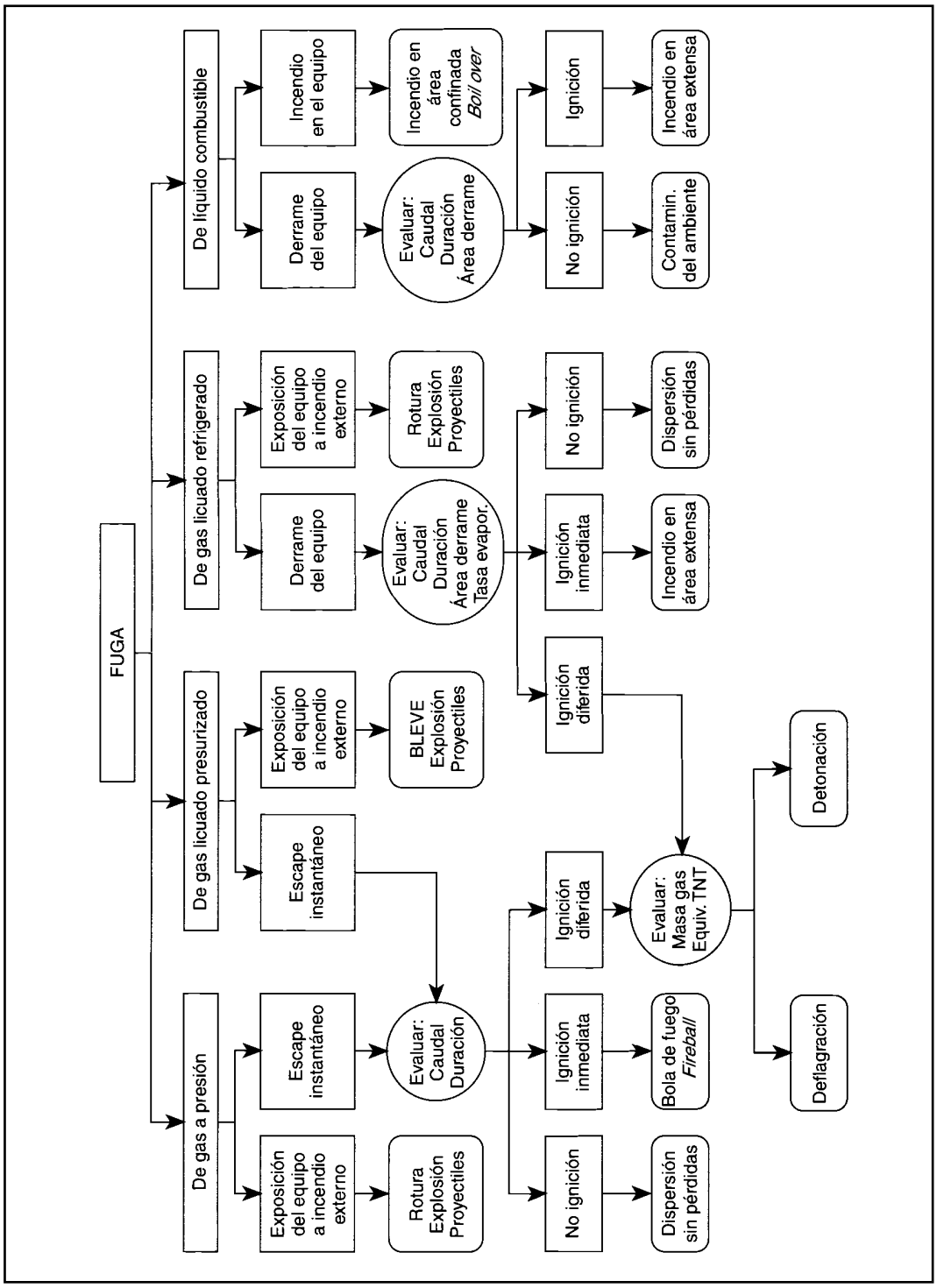
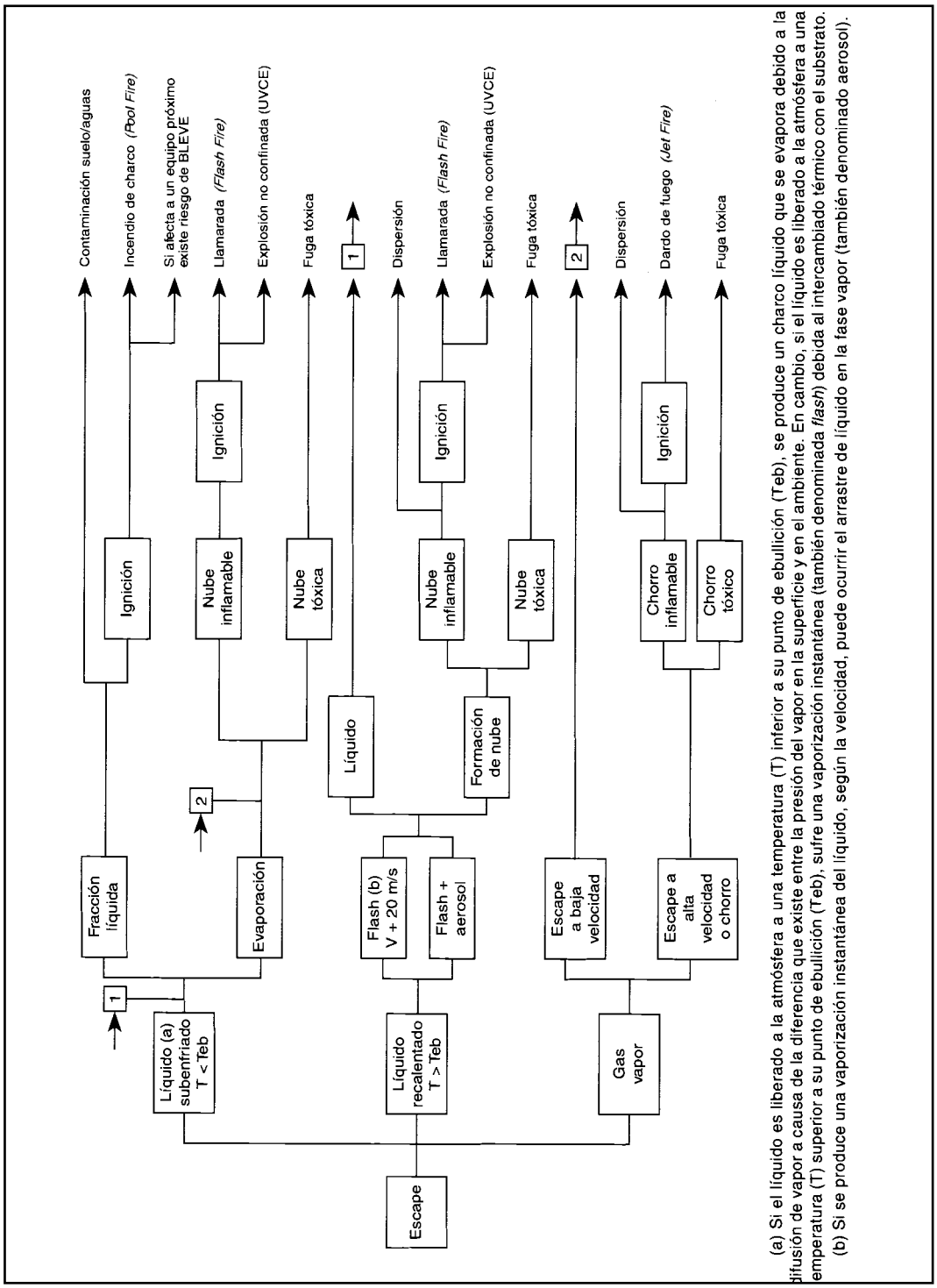


Figura 1.1. Los escapes como fuentes de incendio y de explosión [1].

02 SEGURIDAD Capítulo 01 21/1/08 09:03 Página 6



(a) Si el líquido es liberado a la atmósfera a una temperatura (T) inferior a su punto de ebullición (Teb), se produce un charco líquido que se evapora debido a la difusión de vapor a causa de la diferencia que existe entre la presión del vapor en la superficie y en el ambiente. En cambio, si el líquido es liberado a la atmósfera a una temperatura (T) superior a su punto de ebullición (Teb), sufre una vaporización instantánea (también denominada *flash*) debida al intercambiado térmico con el substrato.
(b) Si se produce una vaporización instantánea del líquido, según la velocidad, puede ocurrir el arrastre de líquido en la fase vapor (también denominado aerosol).

Figura 1.2. Evolución de un escape de fluido [1].

02 SEGURIDAD Capítulo 01 21/1/08 09:03 Página 7

*A) Incendio de líquido en disposición abierta (de charco/***pool-fire***).*

Se trata de un caso en el que el incendio se produce en una condición abierta (no presurizada).

a) Líquido derramado en un área más o menos extensa.
b) Recipiente abierto (sin techo) o a presión atmosférica.

Las manifestaciones de este tipo de incendio suelen ser la emisión de calor radiante y la de humos.

*B) Incendio de líquido con rebosamientos violentos (***boil-over** ***y* slop-over*).***

Se trata de complicaciones del caso anterior que, generalmente, se presentan en los incendios de tanques para almacenamiento donde la altura de líquido combustible es considerable. Los dos fenómenos que consideramos aquí dan lugar a proyecciones o rebosamientos que pueden propagar el incendio y/o sus efectos dañinos.

La combustión en la superficie del líquido genera calor que se transmite (por conducción y convección) hacia las capas inferiores del mismo. En estas últimas se da la presencia de agua (decantada o emulsionada) procedente: a) del propio almacenamiento o b) de la inyección extintora de agua o espuma. Se producirá ebullición de la misma con formación de burbujas grandes de su vapor. Éste ascenderá a través del líquido impulsando parte del mismo de manera que rebosa o se proyecta fuera del tanque. En la literatura anglosajona se distinguen, según el origen del agua mencionado antes, las denominaciones *boil-over* (caso a) anterior y *slop-over* (caso b) anterior.

*C) Incendio de gases o vapores en nube abierta (bola de fuego/***fireball***).***

Es el caso de inflamación inmediata (no diferida) de una nube de gases o vapores que se ha situado de forma rápida en espacio abierto. Sus efectos intrínsecos son:

a) Radiación térmica y de corta duración originada en una llama voluminosa.
b) Evolución hacia la forma de hongo por la ascensión de gases muy calientes y más ligeros que el aire.
c) Sobrepresión no significativa.

02 SEGURIDAD Capítulo 01 21/1/08 09:03 Página 8

Más adelante se verá que este caso se da, con carácter especialmente dramático, cuando se produce la explosión con evaporación (sin o con efecto BLEVE) de gases licuados inflamables [42].

*D) De gases o vapores en fuga local presurizada (dardo/***jet-fire***).*

Cuando hay una fuga localizada de gases o vapores (inflamables) a presión (por ejemplo a través de perforaciones, bridas o estopadas no estancas, etc.), ésos se pueden incendiar dando lugar a un fuego semejante al del dardo de un soplete. Tal tipo de incendio tiene un peligro relativamente bajo en sí mismo (se deberá cortar la fuente de presión y caudal que origina la fuga y proceder a la extinción), pero si el dardo afecta a equipo colindante, puede dar lugar a otros accidentes más graves. Ello determina que se deba evitar la cercanía de elementos propensos a fugas con respecto a otros para evitar tal efecto de propagación.

1.1.3. Explosiones

Las explosiones son fenómenos caracterizados por el desarrollo de una presión (dentro de sistemas cerrados) o de una onda de sobrepresión (en espacios abiertos) que dan lugar a daños mecánicos.

Según su origen y naturaleza las explosiones pueden estar en el inicio de una fuga (con consecuencias tóxicas y/o incendiarias) o deberse a la evolución de una combustión autoacelerada hacia la detonación (propagación supersónica) como se verá más adelante. Éste parece el criterio más pedagógico para iniciar la clasificación de los tipos de explosiones que deberán incluir, además, la consideración de origen, de los materiales y del grado de contención que los caracterizan.

En el texto presente nos vamos a limitar a las explosiones que suelen afectar a instalaciones industriales: en aparatos, recipientes y tuberías; de gases, vapores, nieblas y polvos.

A los efectos que nos ocupan, se pueden clasificar las explosiones de la manera siguiente:

1. Explosiones antecedentes iniciadoras: por exceso de presión, por debilitamiento de los materiales en los continentes, por fuga con ebullición normal por fuga o masiva (BLEVE)
   - A. Iniciadoras de fugas
   - B. Como consecuencia de fugas

02 SEGURIDAD Capítulo 01 21/1/08 09:03 Página 9

2. Explosiones consecuentes de un incendio	C. Como consecuencia de incendios
3. Explosiones consecuentes de otras explosiones	D. Como consecuencia de otras explosiones

A) Explosiones iniciadoras de fugas

Como se ha dicho antes, son las que dan lugar a una fuga iniciando así una cadena accidental que puede continuar con emisión tóxica, incendio y otras explosiones. Se pueden clasificar según se den en sistemas cerrados (CVCE = *confined vapour cloud explosion* en términos anglosajones) o en sistemas semiabiertos:

- A.1. Explosiones iniciadoras en sistemas cerrados (CVCE)
  - A.1.1. Por exceso de presión
    - A.1.1.1. Por causas del proceso: conexión indebida a equipo con presiones mayores, golpes de ariete, etc.
    - A.1.1.2. Reacciones o descomposiciones exotérmicas descontroladas o indebidas (incluye las combustiones explosivas)
    - A.1.1.3. Por dilatación de una fase líquida única
  - A.1.2. Por debilitamiento de materiales debido a calor, frío, corrosión

El peligro de explosión por exceso de presión (A.1.1) significa que, por alguna de las razones indicadas arriba, se sobrepase la presión correspondiente a la resistencia mecánica de los sistemas contenedores (recipientes, tuberías, etc.) determinándose así el fallo de contención o confinamiento que origina la fuga del fluido contenido. Esta causa determina la criticidad del diseño de proceso y equipo para su prevención mediante:

- Diseño de recipientes y tuberías: materiales, espesores, presiones y temperaturas de diseño.

02 SEGURIDAD Capítulo 01 21/1/08 09:03 Página 10

- Dispositivos para el alivio controlado de presiones excesivas.
- Instrumentación protectora que controla las condiciones del proceso y de las reacciones incluyendo las paradas de emergencia y el apagado de reacciones, etc.

(La tercera parte del texto presente considera tales precauciones y medios protectores).

El debilitamiento de materiales (A.1.2) debido al calor, al frío o a la corrosión se previene mediante:

- Protección contra el calor: calorifugado, refrigeración, etc.
- Protección contra el frío: acompañamiento térmico, calefacción, etc.
- Protección contra la corrosión: materiales y sobreespesores para corrosión o revestimientos adecuados, protecciones eléctricas, inspecciones periódicas, etc.

A.2. Explosiones iniciadoras en sistemas semiabiertos por despresurización súbita de líquidos
- A.2.1. Fuga controlada (sin explosión ni incendio)
- A.2.2. Fuga corriente
- A.2.3. Fuga con ebullición
  - A.2.3.1. Sin ebullición masiva
  - A.2.3.2. Con ebullición masiva (efecto BLEVE)

La apertura parcial de sistemas cerrados, pasándolos a la condición de semiabiertos, ocurre cuando se produce un orificio (por impacto de un proyectil, por apertura de un dispositivo de alivio (válvula de seguridad o disco de ruptura), etc., o una grieta (por fallo del material, como efecto de un impacto, choque o calor de incendio exterior). En algunos casos se produce entonces una fuga corriente de fluido a presión o una fuga controlada (por ejemplo: recogida a un colector y enviada a su tratamiento o destrucción). Hay otro caso que debe ser objeto de consideración especial dada la índole dramática de las consecuencias que pueden derivarse de la fuga. Se trata de aquellos sistemas que contienen líquido/vapor a temperatura superior a la que corresponde al equilibrio entre dichas fases a la presión atmosférica (A.2.3). Se trata de un ca-

02 SEGURIDAD Capítulo 01 21/1/08 09:03 Página 11

so frecuente en las industrias que nos ocupan: recipientes para almacenamiento y proceso de gases licuados de todo tipo (GLP, GNL, VCM, amoníaco, etc.), líquidos calientes en reactores y hornos, agua en determinadas secciones de las calderas de vapor, etc. En tales situaciones la apertura parcial del sistema, por cualesquiera de los medios indicados, provoca el desarrollo de la secuencia siguiente:

a) *Situación inicial:* líquido contenido en equilibrio (presión y temperatura: t_1 P_1) con su vapor ambos a temperatura superior a la que corresponde el equilibrio *L/V* a presión atmosférica (t_a, P_a): $t_1 > t_a$, $P_1 > P_a$.
b) *Despresurización súbita* (por la citada apertura parcial del sistema) cayendo la presión desde su valor inicial P_1 en a) hasta la presión atmosférica P_a. Consecuencia: líquido en condición de equilibrio metaestable ($t_2 = t_1$; $P_2 = P_a$) y transitorio; se dice que está sobrecalentado por encontrarse a una temperatura superior a la que corresponde al equilibrio *L/V* a la presión atmosférica actual en esta etapa. Tal sobrecalentamiento constituye un potencial enorme para la evaporación de la fase líquida.
c) *Ebullición del líquido en situación inestable*. Según las propiedades del fluido y de las condiciones iniciales (t_1; P_1) del mismo, el grado de sobrecalentamiento $t_2 - t_a$ puede ser menor o mayor que un cierto valor crítico. Por debajo de tal valor crítico se producirá una evaporación rápida e importante (A.2.3.1) aunque de efectos limitados. Si se iguala o se supera el valor crítico de sobrecalentamiento la ebullición será súbita y masiva con un aumento de volumen tal que determinará una onda mecánica de sobrepresión enorme. Esto último es lo que se denomina efecto BLEVE (*boiling liquid expansion vapour explosion*) que tiene efectos catastróficos (A.2.3.2).
d) *Rotura del sistema contenedor* (generalmente un recipiente). Al no poder resistir la potente onda de presión generada por el efecto BLEVE, el recipiente se rompe en pedazos que:

   - Se disparan como proyectiles a distancias de hasta centenares de metros.
   - Pueden arrastrar consigo porciones de líquido eventualmente peligroso.

La onda de explosión BLEVE se transmite en el espacio pudiendo causar daños mecánicos.

e) *Dispersión de niebla* (partículas de líquido suspendidas en vapor) procedente del fluido contenido inicialmente, formando una nube cuyo diámetro puede ser de algunos centenares de metros.

02 SEGURIDAD Capítulo 01 21/1/08 09:03 Página 12

Con la formación de la nube citada en e) anterior terminan los efectos intrínsecos del efecto BLEVE. Tal nube, dependiendo de las características (toxicidad, inflamabilidad) de la materia que la constituye, es una fuente potencial de otros accidentes: contaminación, intoxicaciones, bola de fuego, deflagración con o sin detonación, etc. El hecho de que los accidentes con efecto BLEVE más catastróficos se hayan seguido de incendios y otras explosiones ha llevado a bastantes autores a asociar estos accidentes secundarios con el BLEVE originador [42]. Ello puede llevar a la confusión del que aborda el estudio de estos accidentes, por lo que aquí deseamos dejar clara la separación entre la explosión BLEVE y sus eventuales accidentes secundarios. Más adelante (apartado 2.2) se ampliará la explicación aquí dada.

A.3.–Explosiones confinadas de polvo suspendido.

Debe incluirse aquí la consideración de las explosiones de polvo que acontecen en el interior del equipo para almacenamiento (silos, etc.) y manipulación (tolvas, conductos, molinos, transportadores de sólidos, etc.) de materias sólidas (carbón, granzas de plástico, etc.). Aunque no suelan dar lugar a fugas como los gases y vapores, las explosiones de polvo suspendido en aire acontecen según mecanismos y tienen consecuencias semejantes a las explosiones de aquéllos.

B) Explosiones como consecuencia de fugas

1. Ignición diferida de gases y vapores no confinados (UVCE).

Este caso (UVCE = *unconfined vapour cloud explosion*) se produce cuando:

a) La nube de vapor o gas fugado es inflamable.
b) La ignición (diferida) de la nube se produce un tiempo después de la fuga.

En tal caso, una parte de la energía de la combustión se manifiesta en forma de energía mecánica asociando al fuego una onda de sobrepresión. Tal onda, a su vez, está conectada con el avance (subsónico: deflagración; supersónico: detonación) del frente de llama en el seno de la nube inflamada. Más adelante se detallará la descripción de los efectos de este tipo de explosión. Un caso de la modalidad que estamos considerando es la segunda explosión después de una con efecto BLEVE, si el vapor fugado es inflamable, y acompañada de incendio en bola de fuego [42].

02 SEGURIDAD Capítulo 01 21/1/08 09:03 Página 13

2. Ignición diferida de polvos y nieblas no confinados.

Como se ha dicho anteriormente, las explosiones de polvo suspendido (a las que añadimos aquí las de niebla) acontecen según mecanismos (por ejemplo, ignición-deflagración-detonación) semejantes a los de gases y vapores. Sus efectos son también parecidos considerando:

a) La carga energética por unidad de volumen es mayor para polvos y nieblas que para gases y vapores.
b) Los polvos tienen menos capacidad de difusión (dispersión) en el espacio que gases, nieblas y vapores.

En su momento (Capítulo 16) se verá la semejanza indicada en el estudio de las explosiones y la defensa ante las mismas.

C) Explosiones como consecuencia de incendios

Para continuar el desarrollo posible de una cadena accidental conviene considerar aquí las explosiones que son consecuencia de un incendio, sin estar asociadas al desarrollo del mismo según B) anterior. Ello ocurre cuando las llamas lamen la parte exterior de un contenedor (recipiente o tubería) calentándolo [42].

El calor originado en un incendio de cualquier tipo puede dar lugar a explosiones tales como las consideradas por otras causas en A) anterior:

C.1. En sistemas cerrados: todas las vistas en A.1 por calentamiento de los contenedores (recipiente y tuberías).
C.2. En sistemas semiabiertos: las vistas en A.2.

La propia apertura parcial del sistema puede deberse al fallo del material del continente por efecto del calor (sobre todo en la parte que está en contacto con la fase de vapor, no refrigerada por la ebullición del líquido). Lo anterior es aparte del calentamiento que da lugar a aumentos de presión y temperatura que también contribuirán a la explosión.

D) Explosiones como consecuencia de otras explosiones

Para completar la consideración de los eslabones posibles de una cadena accidental es conveniente mencionar aquí que una explosión puede desencadenar fugas, incendios y otras explosiones [42] y [43].

Por una parte la onda explosiva puede deformar y hasta destruir equipos continentes (recipientes, tanques, columnas, tuberías, etc.) a su paso. Por otro

02 SEGURIDAD Capítulo 01 21/1/08 09:03 Página 14

lado los proyectiles procedentes de una explosión pueden causar efectos similares. Las pérdidas de contención derivadas de tales eventos pueden continuar la cadena accidental.

Anteriormente se ha visto que los proyectiles procedentes de explosiones con efecto BLEVE pueden arrastrar consigo porciones de líquido que, si es inflamable, puede originar incendios subsiguientes lejos del origen.

1.2. ESTADÍSTICAS DE ACCIDENTES

A continuación se incluyen algunas estadísticas de accidentes importantes con algunos comentarios: su análisis permite percibir el perfil cualitativo del tema objeto del texto presente: análisis, prevención y mitigación de los accidentes en la industria (véanse Tablas 1.1 a 1.9).

Tabla 1.1. (*) Este decenio comprende desde 1990 hasta el primer trimestre de 1996.

Distribución de accidentes por decenios [2]									
Decenio	Incendios			Explosiones			Total incendios y explosiones		
	Número	Víctimas	Promedio víctimas de incendio	Número	Víctimas	Promedio víctimas de incendio	Número	Víctimas	Promedio víctimas de incendio
1900-09	8	2.678	334,7	2	420	210,0	10	3.098	309,8
1910-19	2	689	344,5	8	2.973	371,6	10	3.662	366,2
1920-29	4	770	192,5	–	–	–	4	770	192,5
1930-39	3	749	249,7	3	395	131,7	6	1.144	190,6
1940-49	7	1.261	180,1	10	1.923	192,3	17	3.184	187,3
1950-59	6	562	93,7	3	1.644	548,0	9	2.206	245,3
1960-69	10	1.208	120,8	3	625	208,3	13	1.833	141,0
1970-79	32	2.904	90,7	15	1.298	86,5	47	4.202	89,4
1980-89	52	4.146	79,7	27	4.782	177,1	79	8.928	113,0
1990-96(*)	54	4.316	79,9	42	3.635	86,5	96	7.951	82,8
1900-1996	178	19.283	108,3	113	17.635	156,6	291	36.978	127,1

En la Tabla 1.1 se observa un incremento en el número de accidentes, con el tiempo, que cabe interpretar como resultado del crecimiento de la actividad industrial y, en cierta medida, del perfeccionamiento de las estadísticas. Por otro lado, cabe deducir una disminución en el número de víctimas/accidente debido al progreso de la seguridad en general y de la seguridad industrial en particular.

02 SEGURIDAD Capítulo 01 21/1/08 09:03 Página 15

Tabla 1.2. Actividades afectadas [2].

Actividad	Incendios		Explosiones		Total	
	Número	% sobre el total	Número	% sobre el total	Número	% sobre el total
Urbana:	118	66,2	11	9,7	129	44,3
Viviendas	8	4,5	8	7,1	16	5,4
Hospitales	17	9,5	–	–	17	5,8
Escuelas	34	3,9	2	1,8	9	3,1
Hoteles	33	19,2	–	–	34	11,8
Recreo	9	18,5	–	–	33	11,3
Comercios	2	5,0	1	0,9	10	3,5
Oficinas	3	1,2	–	–	2	0,7
Prisiones	5	1,7	–	–	3	1,0
Resto		2,8	–	–	5	1,7
Rural-Forestal:	5	2,8	–	–	5	1,7
Rural	5	2,8	–	–	5	1,7
Transporte:	16	9,0	14	12,4	30	10,3
Naval	9	5,0	7	6,2	16	5,5
Carretera	3	1,7	1	0,9	4	1,4
Ferrocarril	4	2,3	5	4,4	9	3,1
Aéreo	–	–	1	0,9	1	0,3
Industrial:	39	22,0	88	77,9	127	43,6
Minería	10	5,6	41	36,3	51	17,6
Química	8	4,5	20	17,6	28	9,6
Militar	1	0,6	13	11,5	13	4,8
Resto	20	11,2	14	12,4	34	11,7
TOTAL	178	100,0	113	100,0	291	100,0

Se confirma aquí lo dicho para la industria química: poco número de accidentes pero, frecuentemente, de severidad importante.

Tabla 1.3. Estado físico del combustible predominante [2]

Estado físico del combustible	Número	Porcentaje
Sólido	198	66,1
Líquido	44	15,1
Gas	49	16,8
TOTAL	291	100,0