



UNIVERSIDAD DE MURCIA

FACULTAD DE QUÍMICA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA

**ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS Y ZONAS DE
PLANIFICACIÓN PARA EXPLOSIONES
INDUSTRIALES ACCIDENTALES
(EN EL ÁMBITO DE LAS DIRECTIVAS SEVESO)**

Memoria que presenta

FERNANDO DÍAZ ALONSO

Ingeniero Químico, para optar al Grado de Doctor por la

Universidad de Murcia

D. Enrique González Ferradás, Profesor Titular del Área de Ingeniería Química en el Departamento de Ingeniería Química, AUTORIZA:

La presentación de la Tesis Doctoral titulada “Análisis de consecuencias y Zonas de Planificación para explosiones industriales accidentales (en el ámbito de las Directivas Seveso)”, realizada por D. Fernando Díaz Alonso, bajo mi inmediata dirección y supervisión, en el Departamento de Ingeniería Química, y que presenta para la obtención del grado de Doctor por la Universidad de Murcia.

En Murcia, a 10 de Mayo de 2006

D. Agustín Miñana Aznar, Profesor Titular del Área de Ingeniería Química en el Departamento de Ingeniería Química, AUTORIZA:

La presentación de la Tesis Doctoral titulada “Análisis de consecuencias y Zonas de Planificación para explosiones industriales accidentales (en el ámbito de las Directivas Seveso)”, realizada por D. Fernando Díaz Alonso, bajo mi inmediata dirección y supervisión, en el Departamento de Ingeniería Química, y que presenta para la obtención del grado de Doctor por la Universidad de Murcia.

En Murcia, a 10 de Mayo de 2006

D. Antonio Bódalo Santoyo, Catedrático de Universidad del Área del Área de Ingeniería Química y Director del Departamento de Ingeniería Química, INFORMA:

Que la Tesis Doctoral titulada “Análisis de consecuencias y Zonas de Planificación para explosiones industriales accidentales (en el ámbito de las Directivas Seveso)” ha sido realizada por D. Fernando Díaz Alonso, bajo la inmediata dirección y supervisión de D. Enrique González Ferradás y D. Agustín Miñana Aznar, y que el Departamento ha dado su conformidad para que sea presentada ante la Comisión de Doctorado.

En Murcia, a 10 de Mayo de 2006

Trabajo presentado para optar al
Grado de Doctor por la Universidad de Murcia
Murcia, 10 de Mayo de 2006

Fernando Díaz Alonso
Ingeniero Químico

Este trabajo ha contado con la financiación del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, mediante una beca de Investigación número 04-00201-UMU-5.

Por ello, expresamos nuestro más sincero agradecimiento a dicha institución.

Finalizada esta Tesis, deseo manifestar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que, de una u otra forma, han colaborado en su elaboración.

En primer lugar, quiero expresar mi gratitud a los profesores Drs. D. Enrique González Ferradás y D. Agustín Miñana Aznar, directores de esta Tesis. Al primero, por su constante voluntad y exigencia y porque no sólo ha sabido orientar y dirigir esta investigación sino que, a menudo, se ha convertido en compañero de trabajo discutiendo algunas cuestiones polémicas y trabajando incansablemente hasta lograr el resultado deseado. Al segundo, por la confianza que siempre me ha demostrado y por los consejos tan valiosos que tanto han contribuido a mejorar este trabajo.

Un lugar destacado en este apartado de agradecimientos lo ocupan mis compañeros del Grupo de Investigación de Seguridad e Higiene en la Industria de la Universidad de Murcia, en especial Juan Francisco, que me ha ayudado en mis continuos naufragios informáticos, demostrando una paciencia digna de admiración. Gracias por soportarme. No podría olvidarme de Daniel, Marta y Teresa, a los que debo agradecer tanto la ayuda que me han prestado facilitándome datos e ideas, como el ánimo recibido durante todo este tiempo.

De igual forma, deseo agradecer a todos los compañeros y profesores del Departamento de Ingeniería Química la confianza y el apoyo que siempre me han ofrecido.

A Leticia, por soportar mis malos momentos, por animarme, por los buenos consejos, por sacar lo mejor de mí, por tantas cosas a las que las palabras nunca harían justicia. Gracias, mi pequeña.

Por último, quisiera agradecer a mis padres Fructuoso y Magdalena, a mis hermanas Elena y Raquel y a Miguel Ángel, pedirles disculpas por las incomodidades que les haya podido ocasionar durante el desarrollo de esta investigación y reconocer, asimismo, el apoyo y el estímulo que de ellos siempre he recibido. A la pequeña Candela, gracias por esa alegría que tanta felicidad nos da a todos.

INDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	10
CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DE LOS ACCIDENTES DE TIPO MECÁNICO.....	12
2.1. Las explosiones en la industria química	12
2.2. La onda de presión	15
2.3. Sustancias explosivas	19
2.3.1. Definiciones	19
2.3.2. Mecanismos de las explosiones de sustancias explosivas o pirotécnicas	22
2.3.2.1. Características generales.....	22
2.3.2.2. Deflagración y detonación.....	22
2.4. Explosiones de nubes de gas o vapor.....	25
2.4.1. Descripción de las nubes.....	25
2.4.2. Deflagración de nubes	25
2.4.3. Detonación de nubes.....	28
2.4.4. Transición de la deflagración a la detonación	30
2.4.5. La audición de la onda explosiva.....	32
2.5. El estallido de recipientes.....	33
2.5.1. Explosiones de origen físico	34
2.5.2. Explosiones de origen químico.....	36
2.6. La proyección de fragmentos	38
CAPÍTULO 3. EFECTOS DE LAS EXPLOSIONES	42
3.1. Efectos sobre los seres humanos	42
3.1.1. Daño al tímpano.....	42
3.1.2. Daño al pulmón.....	44
3.1.3. Daño por desplazamiento e impacto del cuerpo	48
3.1.4. Ecuaciones PROBIT seleccionadas para el análisis del daño a los seres humanos.....	50
3.1.5. Daño producido por el impacto de fragmentos sobre los seres humanos	52
3.2. Efectos sobre las estructuras	53
3.2.1. Ecuaciones PROBIT seleccionadas para el análisis del daño a los edificios	53
3.2.2. Daños producidos por el impacto de fragmentos sobre estructuras	56
3.3. El impulso mecánico de los fragmentos	59

CAPÍTULO 4. CARACTERÍSTICAS SOBREPRESIÓN-IMPULSO-DISTANCIA PARA LAS EXPLOSIONES INDUSTRIALES ... 62

4.1. Características sobrepresión-impulso-distancia.....	62
4.1.1. Características obtenidas con el método del TNT equivalente.....	64
4.1.2. Características obtenidas con el método de Multienergía.....	66
4.1.3. Características obtenidas con el método de Baker.....	72
4.1.3.1. Recipientes esféricos.....	73
4.1.3.2. Recipientes cilíndricos.....	73
4.2. Dominio de las características de las explosiones.....	76
4.3. Evaluación comparativa de los daños provocados por las explosiones.....	91
4.4. Análisis de consecuencias.....	93

CAPÍTULO 5. ZONAS DE PLANIFICACIÓN..... 98

5.1. Análisis de los valores umbral para Zonas de Planificación propuestos en la legislación española.....	98
5.1.1. Análisis de los valores límite de la sobrepresión y del impulso de las explosiones.....	98
5.1.2. Análisis de los valores límite de los fragmentos generados en la explosión de recipientes.....	101
5.2. Criterios para establecer nuevos valores límite para Zonas de Planificación como consecuencia de explosiones accidentales en la industria.....	102
5.3. Valores límite propuestos para explosiones accidentales.....	103
5.4. Elección del umbral que determina la distancia de Planificación.....	106
5.5. Metodologías para determinar las Zonas de Planificación.....	111
5.5.1. Procedimiento para el método del TNT equivalente.....	111
5.5.2. Procedimiento para el método Multienergía.....	113
5.5.3. Procedimiento para el estallido de recipientes utilizando el método de Baker.....	117

CAPÍTULO 6. LEGISLACIÓN COMPARADA EN MATERIA DE RIESGO QUÍMICO EN LOS PRINCIPALES PAÍSES DE LA UNIÓN EUROPEA..... 124

6.1. Zonas de Planificación para accidentes graves de tipo mecánico en los principales países de Europa.....	124
6.1.1. Francia.....	124
6.1.2. Reino Unido.....	125
6.1.3. Alemania.....	126
6.1.4. Italia.....	127

6.2. Comparación de los valores límite y Zonas de Planificación de los principales países de la UE con la propuesta de este trabajo.....	128
6.3. Conclusiones	129
CAPÍTULO 7. PROGRAMA INFORMÁTICO.....	130
7.1. Manual de usuario	132
CAPÍTULO 8. COMPARACIÓN DE PROGRAMAS INFORMÁTICOS	178
8.1. Descripción de los programas utilizados	178
8.2. Explosiones de nubes de vapor	179
8.2.1. Explosión de Flixborough (1974).....	179
8.2.2. Explosión de Wesseling (1985).....	182
8.3. Estallidos de recipientes.....	184
8.3.1. Recipiente con un gas permanente.....	184
8.3.2. Recipiente con un gas almacenado en equilibrio líquido-vapor	186
8.4. Conclusiones	188
CAPÍTULO 9. PLANTEAMIENTOS GENERALES Y CONCLUSIONES ..	190
PERSPECTIVAS DE INVESTIGACIÓN.....	194
ANEXO I. MODELOS DE CÁLCULO DE LA SOBREPRESIÓN, DEL IMPULSO Y DEL ALCANCE DE LOS FRAGMENTOS EN LAS EXPLOSIONES INDUSTRIALES ACCIDENTALES	196
I.1 Perspectiva general de los métodos más utilizados para el cálculo de las explosiones	196
I.1.1. Detonación de sustancias explosivas.....	196
I.1.2. Explosión de nubes de vapor.....	197
I.1.2.1. Métodos basados en el TNT.....	197
I.1.2.3. Métodos fluidodinámicos	200
I.1.3. Estallido de recipientes.....	201
I.2. Método del TNT equivalente.....	202
I.2.1. Descripción de la metodología de cálculo.....	204
Sustancias.....	206
I.2.2. Aplicabilidad del método del TNT equivalente	209
I.3. Método Multienergía	210
I.3.1. Criterios para seleccionar el nivel de explosión apropiado.....	213
I.3.2. Procedimiento de aplicación del método Multienergía.....	219

I.4. Métodos específicos para estallido de recipientes	225
I.4.1. El método de Baker	226
I.4.1.1. Método de Baker refinado. Determinación de la sobrepresión escalada P' para el estallido de un recipiente a presión con un gas ideal y distancia escalada $R' < 2$	234
I.4.2. Metodología para la determinación del alcance de los fragmentos	243
ANEXO II. EJEMPLOS DE CÁLCULO	262
II.1. Ejemplo para sustancias explosivas	262
II.1.1. Aplicación del método TNT equivalente a una explosión de clorato sódico	262
II.1.1.1. Escenario	262
II.1.1.2. Aplicación del procedimiento	262
II.1.2. Cálculo de las Zonas de Planificación	263
II.2. Ejemplo para nubes de vapor	265
II.2.1. Aplicación del método Multienergía con la metodología GAME de selección del nivel de explosión	265
II.2.1.1. Descripción del escenario	265
II.2.1.2. Datos básicos del propano	265
II.2.1.3. Aplicación del procedimiento	266
II.2.2. Cálculo de las Zonas de Planificación	278
II.3. Ejemplo para recipientes a presión con gas ideal	280
II.3.1. Descripción del escenario	280
II.3.2. Aplicación del procedimiento	280
II.3.3. Cálculo de la distancia alcanzada por los fragmentos	285
II.3.4. Cálculo de las Zonas de Planificación	287
II.4. Ejemplo para recipientes a presión con gas no ideal	288
II.4.1. Descripción del escenario	288
II.4.2. Aplicación del procedimiento	288
II.4.3. Cálculo de la distancia alcanzada por los fragmentos	293
II.4.4. Cálculo de las Zonas de Planificación	295
ANEXO III. APLICACIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS DE CÁLCULO SELECCIONADOS AL ANÁLISIS DE ACCIDENTES REALES	296
III.1. Análisis de accidentes sin considerar el alcance de los fragmentos	297
III.1.1. Accidente 1: explosión de una nube de vapor en Flixborough (Reino Unido)	297
III.1.2. Accidente 2: explosión de una nube de vapor en Wesseling (Alemania)	298

III.1.3. Accidente 3: detonación de materiales explosivos en Peterborough (Reino Unido).....	300
III.1.4. Accidente 4: explosión de una nube de vapor en Saint-Herblain (Francia).....	301
III.1.5. Accidente 5: estallido de un recipiente esférico en Beijing (China)	302
III.1.6. Accidente 6: detonación de material pirotécnico en Enschede (Holanda).....	303
III.1.7. Accidente 7: explosión de una nube de vapor en Taiwán	304
III.1.8. Accidente 8: detonación de nitrato amónico en Toulouse (Francia).....	305
III.1.9. Accidente 9: estallido de un camión cisterna en Tivissa, Tarragona (España).....	307
III.1.10. Accidente 10: detonación de materiales explosivos en Billy-Berclau (Francia).....	308
III.2. Análisis de accidentes que dieron lugar a fragmentos	310
III.2.1. Accidente 11: estallido de un recipiente cilíndrico en Doe Run (Perú).....	310
III.2.2. Accidente 12: estallido de un recipiente esférico en Feyzin (Francia).....	311
III.2.3. Accidente 13: estallido de un recipiente cilíndrico -Baker (1977)-	312
III.2.4. Accidente 14: estallido de un recipiente cilíndrico -Baker (1977)-	313
III.2.5. Accidente 15: estallido de un camión cisterna en Los Alfaques (España).....	314
III.2.6. Accidente 16: estallido de un recipiente esférico en San Juan Ixhuatepec (México).....	315
III.2.7. Accidente 17: estallido de un recipiente cilíndrico en Grangemouth (Reino Unido)	316
III.2.8. Accidente 5: estallido de un recipiente esférico en Beijing (China)	317
III.2.9. Accidente 9: estallido de un camión cisterna en Tivissa, Tarragona (España).....	318
III.3. Metodologías de cálculo para los accidentes analizados en el apartado III.1	319
III.3.1. Detonación de explosivos	320
III.3.2. Explosión de nubes de vapor	321
III.3.3. Estallido de recipientes	322
III.4. Metodologías de cálculo para los accidentes analizados en el apartado III.2.....	324

ANEXO IV. LA FUNCIÓN PROBIT APLICADA A LOS ACCIDENTES DE TIPO MECÁNICO	334
--	-----

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	340
NOMENCLATURA.....	350
ÍNDICE DE TABLAS.....	358
ÍNDICE DE FIGURAS	364

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La industria desempeña un papel básico en el desarrollo de la sociedad. La mayor parte de los productos o materiales que utilizamos en nuestra vida cotidiana procede de la tecnología industrial química, pero su desarrollo conlleva la aparición de multitud de situaciones de riesgo que, en ocasiones, se materializan en accidentes de graves consecuencias (Flixborough, San Juan de Ixhuatepec, Bhopal, Toulouse, Enschede...) y en otros muchos que, aun siendo de menor magnitud, ocasionan una gran cantidad de víctimas, pérdidas materiales y daños severos al medio ambiente.

Los riesgos de estas actividades están relacionados con las características peligrosas de las sustancias o productos utilizados (inflamables, tóxicos o explosivos), con las condiciones de trabajo (temperatura, presión,...) y con el elevado volumen de producción necesario para satisfacer la demanda cada vez mayor del mercado. Estos riesgos pueden materializarse en accidentes como consecuencia de errores humanos, fallos materiales, aparición de condiciones imprevistas o desviación de las variables de proceso, entre otros.

La peligrosidad el cumplimiento de los imperativos legales plantean la necesidad de realizar importantes inversiones en sistemas de prevención que disminuyan la posibilidad de accidentes pero, a pesar de ello, no es posible garantizar plenamente la eliminación de la probabilidad de ocurrencia, por lo que, además, es necesario adecuar las medidas de protección internas y externas - Planes de Emergencia- para mitigar en su caso los daños producidos, cuyas consecuencias pueden hacerse patentes en zonas muy extensas de su entorno. Por tal razón es necesario disponer de metodologías que permitan determinar las zonas que pueden verse afectadas para prever los medios y métodos de actuación.

Entre los accidentes más importantes de la industria química y afines (incendios, explosiones, o vertidos y emisiones tóxicas), las graves consecuencias derivadas de las explosiones justifican los esfuerzos en materia de prevención, dada la peligrosidad intrínseca del fenómeno, su inmediatez y la posibilidad de provocar otros accidentes de forma concatenada -efecto dominó-, que en ocasiones generan daños más importantes que el accidente precursor.

De los diferentes tipos de explosiones, se estudian en este trabajo las producidas por la detonación de explosivos, sustancias pirotécnicas e inestables, las ocasionadas por la ignición de nubes de vapor y los estallidos de recipiente, con el objetivo de establecer Zonas de Planificación, lo que implica determinar previamente las variables primarias características -sobrepresión, impulso y alcance de los fragmentos-.

La experimentación en este campo presenta grandes dificultades técnicas y económicas, lo que justifica la escasa bibliografía publicada sobre explosiones de

cierta entidad, por lo que la mayoría de las evaluaciones se realiza por extrapolación a partir de experiencias a pequeña escala o a partir de los resultados obtenidos mediante la aplicación de modelos informáticos. En este trabajo se proponen procedimientos basados en las metodologías de cálculo más aceptadas, tratando de alcanzar los objetivos que se indican a continuación:

1. Realizar una evaluación bibliográfica de lo publicado hasta ahora sobre los modelos propuestos para el cálculo de las magnitudes peligrosas de las explosiones -sobrepresión, impulso y alcance de los fragmentos-, así como sobre los criterios de daño a los seres humanos y a las edificaciones, seleccionando los más relevantes.
2. Desarrollar una metodología de estimación de consecuencias basada en la definición de relaciones características sobrepresión-impulso-distancia, a partir de los modelos de cálculo seleccionados para los diferentes tipos de explosiones.
3. Proponer nuevos valores límite para el cálculo de las Zonas de Planificación, que pueden servir a los responsables (industriales y organismos competentes) para estimar el alcance de los fenómenos peligrosos, necesario para establecer los medios y actuaciones de protección.
4. Adecuar los métodos de cálculo a los procedimientos para determinar las Zonas de Planificación.
5. Aplicar los nuevos valores límite a varios accidentes relevantes acaecidos en la industria con el objeto de estimar la idoneidad de dichos valores.
6. Recopilar y contrastar la legislación de los principales países de la Unión Europea sobre los valores límite para determinar las Zonas de Planificación, con el objeto de comparar la propuesta de este trabajo con los establecidos en países de nuestro entorno.
7. Desarrollar un programa informático que permita calcular las magnitudes peligrosas de las explosiones industriales, el alcance de los daños a personas y edificaciones, así como las Zonas de Planificación propuestas en este trabajo.

CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DE LOS ACCIDENTES DE TIPO MECÁNICO

2.1. LAS EXPLOSIONES EN LA INDUSTRIA QUÍMICA

Una explosión puede definirse como la generación de una onda de presión en el aire como consecuencia de la liberación de energía extremadamente rápida. Dentro de esta definición tan amplia tienen cabida diversos fenómenos físicos y químicos que, con cierta probabilidad, pueden presentarse en la industria que procesa o utiliza sustancias peligrosas (*IChemE, 1994*). En estas industrias las explosiones representan, junto con los incendios, los accidentes más frecuentes y destructivos (*Contini, 1993*), destacando las dedicadas a la fabricación de explosivos o materiales pirotécnicos, las que utilizan gases inflamables o las instalaciones que, sin haber sustancias capaces de provocar una explosión por sí mismas, disponen de recipientes donde pueden generarse elevadas presiones que al provocar su estallido liberan la energía contenida de forma violenta.

Las tablas 2.1 a 2.3 proporcionan una visión general de la importancia de las explosiones en las industrias mencionadas; en las tablas 2.4 a 2.6 se relacionan también algunos de los accidentes más importantes ocurridos, agrupados por la tipología de la explosión.

TABLA 2.1. Distribución de incendios y explosiones en industrias que utilizan o procesan hidrocarburos entre 1957 y 1986 (*Garrison, 1988*).

Accidente	Proporción (%)
Incendios	35
Explosión de nube	42
Otras explosiones	22
Otros	1

TABLA 2.2. Incendios y explosiones en industrias de proceso. Los datos proceden de una muestra de 83 accidentes ocurridos en un periodo de 5 años. (*Lees, 1996*).

Tipología	Porcentaje (%)
Incendios	32
Explosiones dentro de equipos por entrada de aire	11
Explosiones dentro de equipos por reacción fuera de control o descomposición explosiva	23
Explosiones fuera de equipos, pero en el interior de edificios	24
Explosiones en exteriores	3
Explosiones de recipientes (debidas a corrosión, sobrecalentamiento o sobrepresión)	7

TABLA 2.3. Causas de las explosiones en industrias de transformación de hidrocarburos (*Planas, 1989*).

Causa de la explosión	Frecuencia (%)
Reacción química incontrolada	20.0
Reacción química accidental	15.0
Combustión o explosión de equipo	13.3
Nubes de vapor libres	10.0
Sobrepresión	8.3
Descomposición	5.0
Chispas de combustión	5.0
Fallo de recipientes a presión	3.3
Operación inadecuada	3.3
Otros	16.8

Aunque de los datos publicados no pueden extraerse conclusiones definitivas, al corresponder a periodos y criterios de clasificación diferentes, se constata que las explosiones más frecuentes en la industria son las producidas por nubes de vapor y el nitrato amónico. En este sentido, las tablas 2.4 y 2.5 recogen algunos casos representativos.

TABLA 2.4. Algunos accidentes de explosiones de nubes de vapor que resume una lista mayor (113 accidentes) publicada por *Lees (1996)* y *Contini (1993)*.

Año	Lugar	Sustancia	TNT equivalente (te)
1974	Flixborough, UK	Ciclohexano	18
1975	Beek, Holanda	Propileno	2.2
	Watson, EEUU	Hidrógeno	0.018
1977	Dallas, EEUU	Isobutano	2.6
1978	Immingham, UK	Syngas	0.03
1979	Texas, EEUU	Propano	0.9
1984	Sarina, Ontario, EEUU	Hidrógeno	0.91
1987	Ras Tanura, Arabia Saudi	Propano	0.9
1991	Pajaritos, México	Propano	--

TABLA 2.5. Accidentes relevantes ocurridos con intervención de nitrato amónico. (*Carol, 2002*).

Fecha	País	Origen	Cantidad (Tm)	Muertos/Heridos
1921	Alemania	Almacén	4572	561/100
1924	EEUU	Proceso	20	17/--
1947	EEUU	Transporte	3160	576/5000
1960	EEUU	Transporte	--	--
1961	EEUU	Proceso	20	--/5
1962	Francia	Proceso		20/--
1972	Australia	Transporte	--	--
1978	Túnez	Almacén	80	3/150
1982	Reino Unido	Almacén	1380	--
1988	EEUU	Almacén	25	6/--
1993	China	Almacén	--	16/161
2001	Francia	Almacén	250	29/650

También se destacan por su especial gravedad los accidentes habidos en instalaciones de producción o almacenamiento de explosivos. Algunos de los de mayores consecuencias se citan en la tabla 2.6.

TABLA 2.6. Algunas explosiones industriales provocadas por explosivos o municiones (Lees, 1996), añadiendo la explosión de Enschede (2000).

Año	Lugar	Explosivo	Muertos/heridos
1913	Ciudad de México	Dinamita	41/100
1917	Ashton, Reino Unido	--	--
	Halifax, Nueva Escocia	Municiones	1963/8000
	Silvertown, Reino Unido	TNT	69/426
1944	Fauld, Reino Unido	Municiones	68/22
1956	Cali, Colombia	Municiones, Dinamita	1200/sin datos
1971	Waco, EEUU	Explosivos	5/33
1985	Checotah, EEUU	Municiones	0/49
1989	Peterborough, Reino Unido	Explosivos	1/107
1990	Meerut, India	Explosivos	50/sin datos
1991	Thung Maproah, Tailandia	Dinamita	123/sin datos
2000	Enschede, Holanda.	Material pirotécnico	22/950

Sea cual fuere el tipo de explosión, sus efectos son comunes y pueden estudiarse de forma conjunta, dado que toda explosión genera una onda de presión que se propaga en el aire y es la responsable de su poder destructivo, al ser el vehículo que transporta la energía liberada que interacciona con los elementos vulnerables. Además de la onda de presión, en algunos casos se producen también fragmentos, especialmente cuando ocurre el estallido de recipientes.

Una característica especial de las explosiones que las diferencia de los demás accidentes típicos de las industrias que utilizan sustancias peligrosas es la corta duración del fenómeno, lo que impide la aplicación de medidas de mitigación que sí pueden ser empleadas frente a otros tipos de accidentes, como los grandes incendios y las fugas tóxicas. Así pues, la única forma de actuar contra las explosiones es mediante la prevención. La planificación de la emergencia comienza evaluando el posible alcance de las magnitudes peligrosas de la explosión (presión máxima, impulso mecánico y alcance de los fragmentos) y, a continuación, el nivel de gravedad encontrado debe relacionarse con las medidas de prevención que el industrial debe incorporar.

Las explosiones pueden clasificarse de diversas formas pero este trabajo sigue un orden acorde con la tipología del producto causante del accidente (sustancia explosiva y nube inflamable) o de equipos donde puedan alcanzarse altas presiones. Antes conviene caracterizar la onda de presión que es el fenómeno peligroso común a cualquier explosión. La proyección de fragmentos

se comenta al final del capítulo. No se estudian en este trabajo las explosiones nucleares, debido a su diferente tratamiento y al quedar fuera de las que pueden producirse en las industrias convencionales.

2.2. LA ONDA DE PRESIÓN

El efecto más característico de una explosión es el brusco aumento de la presión que se produce en el aire circundante y que se propaga en forma de onda en todas las direcciones libres del espacio. La forma, características y magnitud de la onda dependen del tipo de explosión, del entorno y de la distancia al origen del accidente.

La máxima presión alcanzada por la onda en un punto dado se conoce como “**pico de presión estática**” o “**sobrepresión estática**”, P_s . El periodo de tiempo en el que la presión es superior a la presión atmosférica (P_o), se conoce como “**duración de la fase positiva**”, t_p . A dicho período suele seguirle una “**depresión**” o fase negativa, que no se tiene en cuenta a efectos de cálculo de consecuencias dado que su valor absoluto máximo es mucho menor que el de la fase positiva.

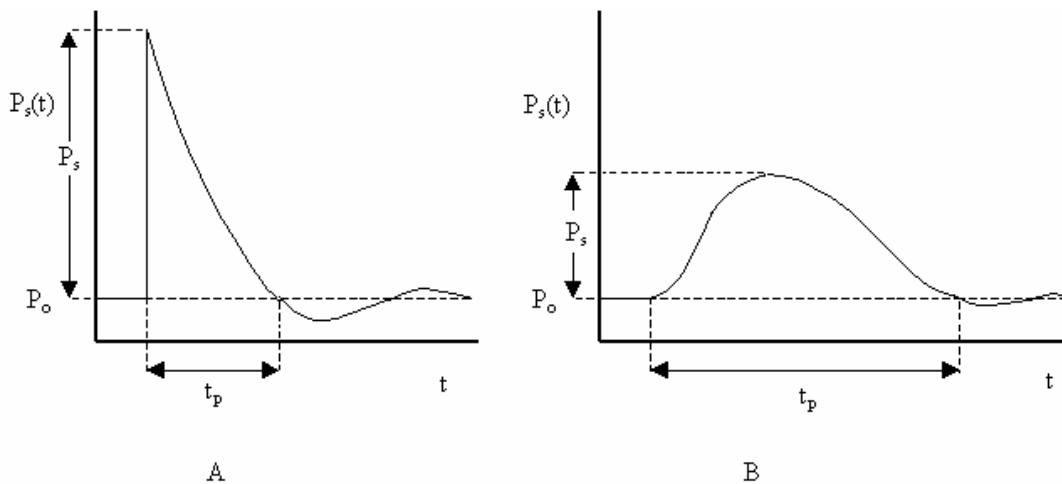


FIGURA 2.1. Evolución de la sobrepresión con el tiempo para explosiones detonantes (A) y deflagrantes (B).

Se distinguen dos perfiles de la onda de presión: el detonante y el deflagrante (figura 2.1, A y B). El primero es más agudo, de manera que el valor máximo se alcanza súbitamente. En una explosión deflagrante, la velocidad de aumento de la presión es mucho más lenta. Otra diferencia significativa de ambos tipos de ondas es que la duración de la fase negativa de las detonantes es mayor que la de las deflagrantes. La onda detonante conforme avanza y se aleja del origen de la explosión, se va suavizando y su perfil acaba siendo similar al de la onda deflagrante. La diferenciación de la onda detonante y deflagrante está

también relacionada con la audibilidad de las mismas, de manera que sólo la primera es audible, aspecto que se comenta en el apartado 2.3.5.

Además del pico de sobrepresión y la duración de la fase positiva, la onda está también caracterizada por el “**impulso mecánico**” ejercido sobre cualquier objeto, en adelante “**impulso**”(i), que se define según la expresión:

$$i = \int_0^{t_p} P_s(t) dt \quad (2.1)$$

Para calcular el valor del impulso los perfiles sobrepresión-tiempo se pueden modelizar como triángulos (figura 2.2); de esta forma el valor del impulso mecánico puede calcularse mediante (TNO, 1989):

$$i = \frac{1}{2} P_s t_p \quad (2.2)$$

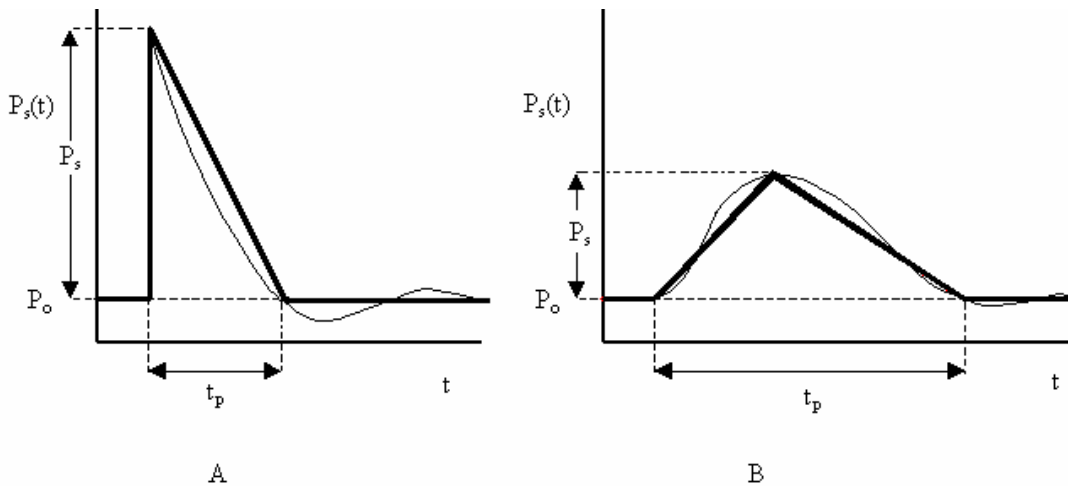


FIGURA 2.2. Simplificación esquemática de la onda de presión detonante (A) y deflagrante (B).

Otras dos propiedades importantes asociadas a las ondas de presión son la **presión dinámica (Q)** y la **presión reflejada (Pr)**. La primera es consecuencia del “viento de la explosión” arrastrado por el avance de la onda (IchemE, 1994), pudiendo provocar el derribo de obstáculos desplazables. Esta presión no actuará sobre superficies paralelas al avance de la onda. Su expresión es (TNO, 1989):

$$Q = \frac{1}{2} \rho_s U^2 \quad (2.3)$$

donde ρ_s es la densidad del aire (kg/m^3) a la presión máxima de la onda y U la velocidad de desplazamiento de la onda (m/s).

El valor de Q puede expresarse en función de la sobrepresión estática mediante (TNO, 1989):

$$Q = \frac{5}{2} \left(\frac{P_s^2}{7P_o + P_s} \right) \quad (2.4)$$

De la ecuación 2.4 se deduce que para valores bajos de P_s , la presión dinámica es menor que la estática, pero a partir de valores de la sobrepresión estática superiores a $5 \cdot 10^5$ Pa, la presión dinámica superaría a la anterior. Hay que reseñar que tales valores de la sobrepresión estática son prácticamente inalcanzables en explosiones reales, salvo para posiciones muy cercanas al centro de la explosión. Por este motivo, a efectos de planificación de emergencias, la presión dinámica podrá considerarse siempre menor que la estática.

La presión reflejada (P_r) es la presión estática que se alcanza en el momento inmediatamente posterior al choque de la onda de presión contra una superficie rígida y viaja en la misma dirección y sentido opuesto a la incidente, tal como se muestra en la figura 2.3.



FIGURA 2.3. Reflexión de una onda de presión en el choque perpendicular contra un obstáculo (Stull, D.R., 1976).

En el caso de que el choque se produzca con un determinado ángulo de incidencia con respecto al obstáculo, α_1 , la onda incidente y la onda reflejada (que viaja con retraso con respecto a aquélla pero casi en la misma dirección) se combinan cerca de la superficie de impacto, formando una nueva onda M casi perpendicular a dicha superficie, denominada frente Mach (“Mach stem”). Como se indica más adelante, la onda reflejada viaja a una velocidad mayor que la incidente, lo que permite que la alcance. El punto donde las tres ondas (incidente, reflejada y Mach) se unen se denomina punto triple. Éste es el caso típico de la

reflexión de una onda de presión contra el suelo; en la figura 2.4 se muestra una secuencia cronológica de este proceso.

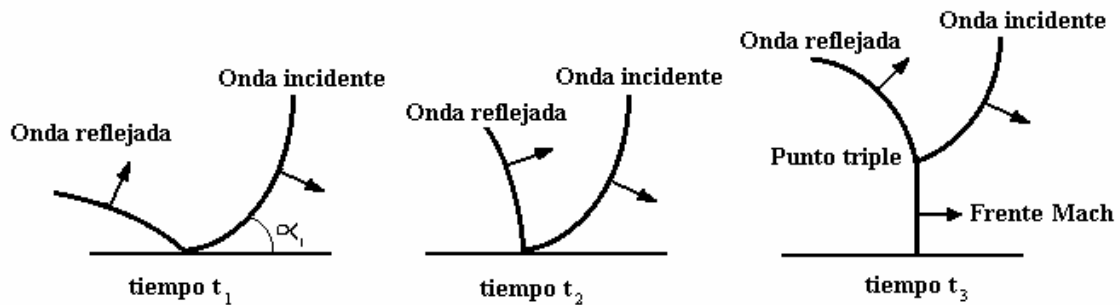


FIGURA 2.4. Secuencia de formación del punto triple y del frente Mach en la reflexión de la onda de presión contra el suelo (Mohanty, B., 1998).

Tanto si la onda incidente choca de forma perpendicular contra el obstáculo como si lo hace con un determinado ángulo, la onda reflejada formada viaja a mayor velocidad, puesto que se desplaza a través de aire precomprimido y precalentado (a causa del paso de la onda incidente). Esto se debe a que la velocidad de desplazamiento de las ondas mecánicas depende de las características del medio, cuya expresión para el aire (considerado ideal) es:

$$U = \sqrt{\frac{1.4RT}{\mu_a}} \quad (2.5)$$

siendo U la velocidad de desplazamiento de la onda (m/s), R la constante de los gases ideales ($R \approx 8 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$), T la temperatura absoluta (K) y μ_a la masa molecular media (0.029 kg/mol).

Según la ecuación 2.5, la velocidad de desplazamiento de la onda de presión se eleva al aumentar la temperatura del medio.

La velocidad de desplazamiento de la onda reflejada (U_r) está relacionada con la sobrepresión estática de la onda incidente. Esta dependencia puede expresarse, según *TNO (1989)*, mediante la ecuación:

$$U_r = c_0 \left(1 + \frac{6P_s}{7P_0} \right)^{1/2} \quad (2.6)$$

donde c_0 es la velocidad del sonido en el aire (m/s). Por lo tanto, cuanto mayor sea la sobrepresión de la onda incidente, mayor será la velocidad de la onda reflejada.

La sobrepresión de la onda reflejada, para el caso de choque frontal, puede estimarse mediante la siguiente expresión (Mohanty, 1998):

$$P_r = 2P_s + (\gamma_a + 1)Q \quad (2.7)$$

Donde γ_a es la razón de los calores específicos del aire a presión y volumen constantes.

Teniendo en cuenta la ecuación 2.4 y el valor de γ_a (1.4), se obtiene:

$$P_r = \frac{8P_s^2 + 14P_sP_o}{P_s + 7P_o} \quad (2.8)$$

Si $P_s \ll P_o$, la ecuación 2.7 se transforma en:

$$P_r \approx \frac{14P_sP_o}{7P_o} = 2P_s \quad (2.9)$$

O al contrario, si $P_s \gg P_o$, la ecuación 2.7 se convierte en:

$$P_r \approx \frac{8P_s^2}{P_s} = 8P_s \quad (2.10)$$

Así pues, la sobrepresión reflejada será siempre superior -de 2 a 8 veces- a la sobrepresión estática de la onda incidente.

2.3. SUSTANCIAS EXPLOSIVAS

2.3.1. Definiciones

Se hace necesario el estudio y la consideración de los explosivos convencionales en el presente documento dado que se incluyen en la Directiva 96/82/CE del Consejo (Seveso II), *relativa al control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas*, modificada por la Directiva 2003/105/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de Diciembre de 2003. Dichas Directivas han sido incorporadas al ordenamiento jurídico español por el Real Decreto 1254/1999, de 16 de julio, *por el que se*

aprueban medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas, y por los Reales Decretos 119/2005, de 4 de febrero y 948/2005, de 29 de Julio, que modifican al anterior.

Se dice que una sustancia es explosiva cuando es capaz de generar muy rápidamente un gran volumen de gases calientes al ser debidamente estimulada. (Kirk, R. E.; Othmer, F., 2001).

Definiciones más concretas de las sustancias explosivas y pirotécnicas son las que se recogen en el anexo I de la Directiva 2003/105/CE y del Real Decreto 948/2005:

“

- *una sustancia o preparado que cree riesgos de explosión por choque, fricción, fuego u otras fuentes de ignición (enunciado de riesgo R2),*
- *una sustancia o preparado que cree grandes riesgos de explosión por choque, fricción, fuego u otras fuentes de ignición (enunciado de riesgo R3), o*
- *una sustancia, preparado u objeto considerado en la Clase 1 del Acuerdo Europeo sobre el Transporte Internacional de Mercancías Peligrosas por Carretera ADR (Naciones Unidas), celebrado el 30 de septiembre de 1957, con sus modificaciones, tal como se incorporó a la Directiva 94/55/CE del Consejo, de 21 de noviembre de 1994, sobre la aproximación de las legislaciones de los Estados Miembros con respecto al transporte de materias peligrosas por carretera.*

Se incluyen en esta definición las sustancias pirotécnicas que, a los efectos de la presente Directiva (o Real Decreto), se definen como sustancias (o mezclas de sustancias) destinadas a producir un efecto calorífico, luminoso, sonoro, gaseoso o fumígeno o una combinación de los mismos, mediante reacciones químicas exotérmicas y autosostenidas. Cuando una sustancia o un preparado esté clasificado tanto en ADR como en los enunciados de riesgo R2 o R3, la clasificación del ADR tendrá preferencia con respecto a la asignación de enunciado de riesgo.

Las sustancias y objetos de la clase 1 están clasificados en alguna de las divisiones 2.1 a 2.6 con arreglo al sistema de clasificación del ADR. Estas divisiones son las siguientes:

División 2.1: “Sustancias y objetos que presentan un riesgo de explosión en masa (una explosión en masa es una explosión que afecta de manera prácticamente instantánea a casi toda la carga)”.

División 2.2: “Sustancias y objetos que presentan un riesgo de proyección sin riesgo de explosión en masa”.

División 2.3: “Sustancias y objetos que presentan un riesgo de incendio con ligero riesgo de efectos de onda expansiva o de proyección o de ambos efectos, pero sin riesgo de explosión en masa:

- a) cuya combustión da lugar a una radiación térmica considerable, o*
- b) que arden unos a continuación de otros con efectos mínimos de onda expansiva o de proyección o de ambos efectos”.*

División 2.4: “Sustancias y objetos que sólo presentan un pequeño riesgo de explosión en caso de ignición o cebado durante el transporte. Los efectos se limitan esencialmente a los bultos y normalmente no dan lugar a la proyección de fragmentos de tamaño apreciable ni a grandes distancias. Un incendio exterior no debe implicar la explosión prácticamente instantánea del contenido de los bultos”.

División 2.5: “Sustancias muy poco sensibles que presentan un riesgo de explosión en masa, con una sensibilidad tal que, en condiciones normales de transporte, sólo existe una probabilidad muy reducida de cebado o de que su combustión se transforme en detonación. Se exige como mínimo que no exploten cuando se las someta a la prueba de fuego exterior”.

División 2.6: “Objetos extremadamente poco sensibles que no supongan riesgo de explosión en masa. Dichos objetos no contendrán más que sustancias detonantes extremadamente poco sensibles y que presenten una probabilidad despreciable de cebado o de propagación accidental. El riesgo queda limitado a la explosión de un objeto único”.

En esta definición también se incluyen las sustancias o preparados explosivos o pirotécnicos contenidos en objetos. En el caso de objetos que contengan sustancias o preparados explosivos o pirotécnicos, si se conoce la cantidad de sustancia o preparado contenida en el objeto, se considerará tal cantidad a los efectos de este Real Decreto. Si no se conoce la cantidad, se tratará todo el objeto, a los efectos de este Real Decreto, como explosivo”.

Las materias y objetos que se incluyen en la Clase 1 del ADR 2001 son los que cumplen las definiciones siguientes:

- “ a) *Materias explosivas: materias sólidas o líquidas (o mezclas de materias) que, por reacción química, pueden desprender gases a una temperatura, presión y velocidad tales que puedan ocasionar daños a su entorno.*

Materias pirotécnicas: materias o mezclas de materias destinadas a producir un efecto calorífico, luminoso, sonoro, gaseoso o fumígeno o una

combinación de tales efectos, como consecuencia de reacciones químicas exotérmicas autosostenidas no detonantes.

- b) Objetos explosivos: objetos que contengan una o varias materias explosivas o pirotécnicas.*
- c) Materias y objetos no mencionados ni en a) ni en b) fabricados con el fin de producir un efecto práctico por explosión o con fines pirotécnicos.”*

2.3.2. Mecanismos de las explosiones de sustancias explosivas o pirotécnicas

2.3.2.1. Características generales

La energía liberada por un explosivo depende de sus propiedades termoquímicas. Como regla general, un gramo de material explosivo genera aproximadamente un litro de gases y libera una kilocaloría en forma de calor de reacción. El que este volumen y energía liberados formen o no una onda de presión apreciable depende principalmente de la velocidad de reacción con la que transcurra el proceso.

Las transformaciones químicas que experimenta un producto cuando explota, son siempre reacciones de oxidación-reducción, que pueden ser de autodescomposición, si el aporte de oxidante de la propia sustancia es suficiente, o bien ocurrir entre oxidantes y reductores que constituyan sustancias diferentes que se encuentran formando mezclas. En general, para que se inicie una reacción de este tipo no es necesaria una energía de activación elevada y una vez desencadenada el calor liberado es suficiente para que ésta se automantenga.

Las sustancias explosivas tienen menores calores de combustión por unidad de masa que los combustibles comunes. Esto se explica porque las primeras contienen grupos oxidantes en su molécula -que no contribuyen al calor de combustión-, mientras que los combustibles convencionales no, ya que necesitan reaccionar con el oxígeno del aire. Pero si se compara el calor de combustión por unidad de masa de explosivo con el calor de combustión por unidad de masa de una mezcla estequiométrica de combustible y oxígeno, la diferencia es pequeña. Así, la detonación de 1 gramo de nitroglicerina produce 2.5 kcal y la combustión de la mezcla estequiométrica carbón-oxígeno genera 2.2 kcal/g.

2.3.2.2. Deflagración y detonación

El calentamiento de un explosivo puede provocar el inicio de una reacción exotérmica (combustión o descomposición, por ejemplo) y el calor resultante

puede producir el aumento de la velocidad de reacción y conducir, en los primeros instantes, a una reacción autosostenida conocida como deflagración. Bajo ciertas condiciones, el frente de reacción deflagrante inicial puede alcanzar velocidad supersónica, transformándose en una onda detonante. En éste, la onda de presión se propaga a una velocidad característica a temperaturas y presiones muy elevadas hacia el explosivo sin reaccionar (*Mohanty, B. 1998*).

La diferencia principal entre el mecanismo de la reacción deflagrante y la detonante consiste en que en esta última la sobrepresión y temperatura generadas por la onda son capaces de producir la descomposición de los reactivos en un tiempo muy pequeño (casi instantáneo), mientras que en la deflagración el fenómeno es más lento, ya que los reactivos se activan mediante el calor liberado en la reacción, que tarda más tiempo en llegar a ellos, debido a la menor velocidad de los mecanismos de transporte.

Así, una visión más ampliada del proceso por el que la deflagración se transforma en detonación sugiere que se inicia mediante una “combustión” lenta de la masa explosiva. El calor producido por la reacción alcanza por conducción a los reactivos, que aumentan de temperatura. Este proceso se acelera cuando el calor comienza a penetrar por los poros del explosivo de forma convectiva, con lo que el transporte se vuelve turbulento, incrementando la velocidad de avance del frente de reacción, manteniendo y aumentando la onda de presión. En los explosivos confinados, la onda inicial producida se refleja al alcanzar las paredes del contenedor y regresa, impactando contra el frente de reacción, provocando un aumento de la presión y de la temperatura, lo que hace que se alcance la autoignición de los reactivos aún no combustionados de forma muy rápida, iniciando la detonación. A partir de ese momento, la velocidad de reacción está controlada por la velocidad de propagación de la onda, y no por los fenómenos de transporte de calor, de tal manera que dicha velocidad permanece estable y constante, y está gobernada por las propiedades físicas y químicas del explosivo, las dimensiones del contenedor, su grado de confinamiento y, sobre todo, por su densidad (*Kirk, R. E.; Othmer, F., 2001*). Esta última propiedad, que se denomina densidad de carga, puede variar en un amplio rango; así, la velocidad del frente de reacción puede alcanzar valores desde aproximadamente 1200 m/s para explosivos de baja densidad, hasta más de 9000 m/s para explosivos con densidades próximas a 2 g/cm³. En cualquier caso, para las densidades normales de la mayoría de los explosivos, la velocidad del frente de reacción no excede de 4000 m/s (*Medard, L.A., 1989*).

La figura 2.5 ayuda a comprender el proceso detonante, basado en la teoría de Chapman-Jouguet modificada -*Coon et al. (1980)* y *Medard, L.A (1989)*-. En ella se supone que el contenedor aún no ha estallado, distinguiéndose las siguientes zonas (*Mohanty, B, 1998*):

1. Productos de reacción donde predominan las sustancias gaseosas formadas a partir del explosivo sólido o líquido lo que origina presiones y temperaturas muy elevadas.
2. Reacción. Separada de la anterior por el “plano de Chapman-Jouguet (C-J)”. En ella se produce la descomposición (proceso redox). Esta zona tiene un espesor aproximado de 1 mm para la mayoría de los explosivos, pero puede alcanzar más de 10 mm para los menos inestables (*Stull, D.R, 1976*).
3. Frente de onda. Las dos zonas anteriores forman un “pistón” cuyo “émbolo” es la onda de presión que puede alcanzar velocidades muy elevadas, antes indicadas. Cuando se alcanza el equilibrio los frentes de reacción y la onda de presión coinciden y viajan a la misma velocidad.
4. La última zona está constituida por los productos aún sin reaccionar.

Todo este proceso se produce en periodos de tiempo muy pequeños, por lo que la potencia desarrollada es muy elevada, rompiendo el contenedor y provocando la brusca expansión de los gases. Una parte de la energía se invierte en formar la onda de presión y la otra es fundamentalmente térmica.

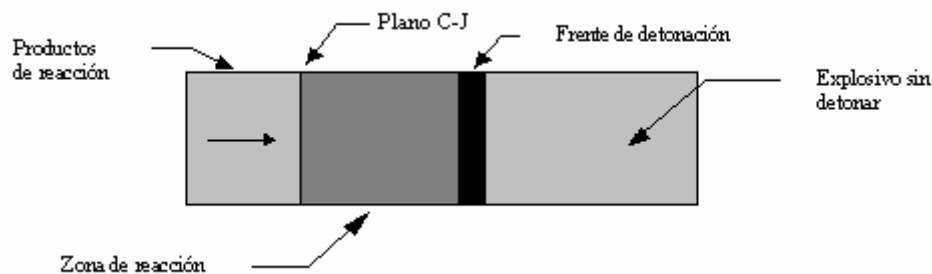


FIGURA 2.5. Esquema simplificado del proceso de detonación de un explosivo

El mismo compuesto o mezcla puede detonar o no, dependiendo del tipo e intensidad de la fuente de energía que produce la ignición, del grado de confinamiento, de las características físicas del material explosivo y la geometría del contenedor. Muchos explosivos detonantes, pueden arder (sin detonar) bajo condiciones especiales que eviten la formación de la onda de presión iniciadora del proceso de detonación (*Kirk, R. E.; Othmer, F., 2001*). Así, se ha observado que el TNT puede arder sin explotar, y el nitrato amónico (con poder explosivo mucho menor) puede detonar si se encuentra confinado.

2.4. EXPLOSIONES DE NUBES DE GAS O VAPOR

Las instalaciones que almacenan, producen o utilizan combustibles gaseosos son más numerosas que las que utilizan sustancias explosivas. Por otro lado, hay que destacar la mayor facilidad con la que las nubes gaseosas pueden encontrar puntos de ignición que originen la combustión de las mismas, fuera incluso de la propia instalación donde se ha generado.

2.4.1. Descripción de las nubes

El término ‘explosión de nube de vapor’ (en inglés VCE, de “Vapour Cloud Explosion”) es usado para definir la combustión de la mezcla combustible-aire formada por la fuga y dispersión de una sustancia combustible en la atmósfera, dando lugar a temperaturas muy elevadas, y generando una onda de presión.

En general, la mayoría de los combustibles tienen pesos moleculares mayores que el aire y, por consiguiente, se comportan como nubes pesadas que se mueven a ras de suelo y pueden encontrar fácilmente una fuente de ignición. Las principales características de las fuentes de ignición y los modos de evitarlas se discuten en la bibliografía (*Santamaría et al., 1998*).

Para que tenga lugar la explosión de la nube, debe producirse la mezcla entre el combustible y el aire dentro de los límites de inflamabilidad. Si el punto de ignición está muy cerca del origen de la fuga el resultado será un incendio de chorro o de charco, según las características de la fuga. Se considera que la máxima probabilidad de formación de una nube explosiva ocurre cuando el periodo de tiempo entre el inicio de la fuga y la ignición está comprendido entre 1 y 15 minutos, si bien se encuentran documentados accidentes en los que se estima que dicho período fue de menos de un minuto, en unos casos, y entre 16 y 30 minutos, en otros (*Lees, 1996*).

Por otro lado, la magnitud de la onda de sobrepresión generada depende de la velocidad de propagación de la llama (frente de reacción). Cuanto mayor sea ésta, mayor será la sobrepresión alcanzada. La velocidad de propagación de la llama depende, a su vez, de la forma en que se inicie y progrese la combustión. Según ocurra ésta, el resultado puede ser una deflagración o, en condiciones más especiales, una detonación.

2.4.2. Deflagración de nubes

Cuando la mezcla inflamable encuentra una fuente de ignición (una pequeña llama, por ejemplo), se inicia el proceso de combustión, donde el frente de llama se propaga inicialmente en régimen laminar. Este frente deja tras de sí los productos de combustión calientes y continúa inflamando los reactivos.

El mecanismo de propagación del frente de llama laminar está gobernado por la difusión molecular del calor. La figura 2.6 (TNO, 1997) muestra un perfil típico de temperatura en el frente de llama laminar, cuyo espesor se estima en aproximadamente un milímetro.

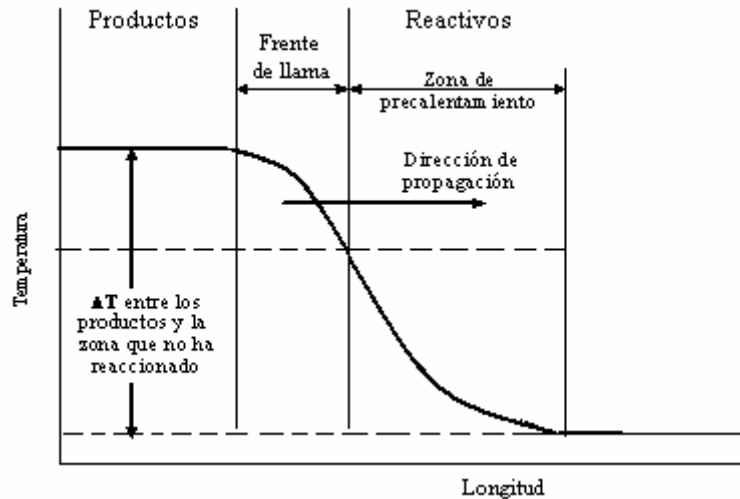


FIGURA 2.6. Perfil de temperatura en la llama laminar

El calor se transfiere por conducción, de la zona de reacción a la zona de precalentamiento. La conducción del calor en fase gas es un proceso relativamente lento, por lo que la velocidad de combustión laminar (aquella a la que se propaga la llama a través de la nube) suele tener valores muy bajos, en torno a 0.5 m/s (ver tabla I.8, en el anexo I).

Sin embargo, la velocidad absoluta de avance del frente de llama no es sólo la velocidad de propagación de la llama a través de la mezcla combustible (es decir, la velocidad de combustión laminar), sino que hay que considerar también el empuje producido por la expansión de los productos de reacción. Por lo tanto, la velocidad absoluta de avance del frente de llama es la suma de la velocidad de combustión laminar y la velocidad de expansión de los gases.

Contrariamente a lo que sucede en la detonación de un explosivo, en la deflagración de las nubes la velocidad de avance del frente de llama o zona de reacción es menor que la de la onda de presión, por lo que avanzan por separado. Esto provoca que la transferencia de energía entre ambas sea mucho menos eficiente que en el caso anterior. Los gases evacuados no contribuyen al mantenimiento e incremento de la onda de presión, por lo que ésta puede ser irrelevante si no aumenta la velocidad absoluta de avance del frente de llama.

La velocidad absoluta del frente de llama se verá incrementada si existen factores que favorezcan la distorsión de la capa laminar, de forma que aumente la superficie específica del frente. Esto se produce cuando la capa laminar tropieza

con objetos, favoreciendo la formación de gradientes de velocidad que inducen una cierta turbulencia que altera el frente de llama, dejando éste de ser laminar. En las zonas turbulentas el transporte de calor dejará de estar controlado por la conducción, pasando a ser convectivo, que es mucho más rápido.

La turbulencia no sólo acelera los fenómenos de transporte, sino que también aumenta la superficie efectiva del frente de llama. Como consecuencia de ello, la formación de los productos quemados es más rápida, aumentando el empuje y, por consiguiente, se incrementa la velocidad absoluta de avance del frente de llama, estableciéndose así un fenómeno cíclico de retroalimentación que se esquematiza en la figura 2.7.

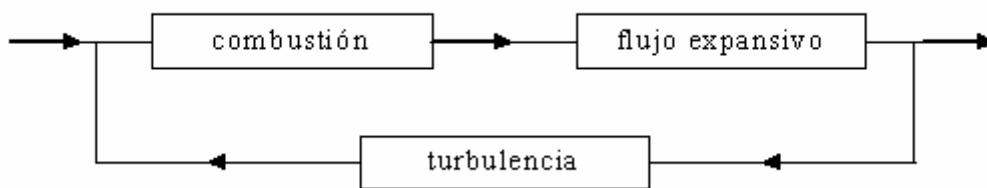


FIGURA 2.7. Mecanismo de retroalimentación de la deflagración (TNO, 1997).

La sobrepresión generada por la explosión depende de la velocidad de avance del frente de llama, por lo que si la deflagración experimenta el fenómeno de retroalimentación y aceleración de la llama, también tendrá efectos más destructivos, al incrementarse la sobrepresión generada. La dependencia entre la velocidad de la llama y la sobrepresión se muestra en la figura 2.8, donde también se incluye el fenómeno de la detonación, comentado a continuación.

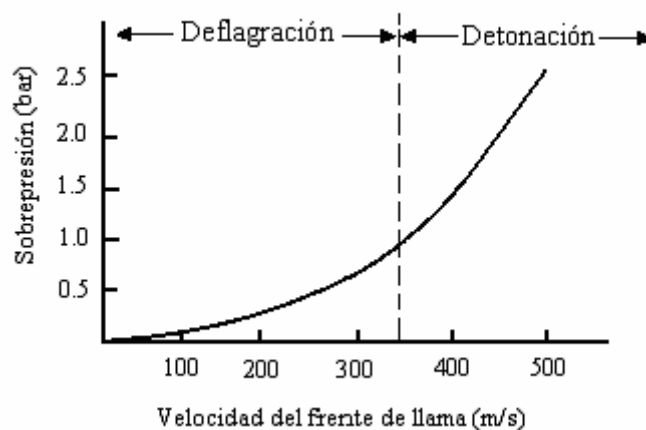


FIGURA 2.8. Relación de la velocidad del frente de llama y la sobrepresión (Lees, 1996)

2.4.3. Detonación de nubes

La detonación se produce cuando el frente de llama alcanza y sobrepasa la velocidad del sonido en la nube. El mecanismo de propagación de la llama es diferente al que ocurre en la deflagración. En este caso, el proceso que gobierna el avance de la llama es la propagación de la onda de presión, que es un fenómeno muy rápido (*van den Berg, 1989*), de manera que la sobrepresión generada por la onda es capaz de llevar los reactivos hasta la temperatura de autoignición, a la que se produce la reacción de descomposición o combustión de forma cuasi instantánea. Este mecanismo es mucho más rápido que el de la deflagración, donde la temperatura de los reactivos aumenta por la transferencia desde los productos de reacción, mucho más lenta.

La teoría Zeldovich, von Neumann y Döring (ZND) (*van Wingerden et al., 1999*) tiene en cuenta la velocidad de reacción y además sugiere que, en la detonación de una mezcla gaseosa, la reacción comienza a producirse tras el paso de la onda de presión, donde los reactivos alcanzan condiciones de autoignición en un período muy corto, denominado de inducción, produciéndose a continuación la reacción química.

Así pues, existe una doble discontinuidad en una onda de choque que se propaga a través del gas. La primera, constituida por la onda de choque propiamente dicha, que suele tener un espesor de unos 10^{-4} cm, aunque contiene suficiente energía para comprimir el gas, aumentando su densidad y su temperatura, así como su turbulencia y velocidad. Si el gas es suficientemente reactivo, esta elevada presión y temperatura lo activan y lo conducen al estado transitorio correspondiente al período de inducción. Tras éste se produce la reacción química, que constituye la segunda discontinuidad (*Stull, D.R., 1976*). Un esquema de este proceso se presenta en la figura 2.9.

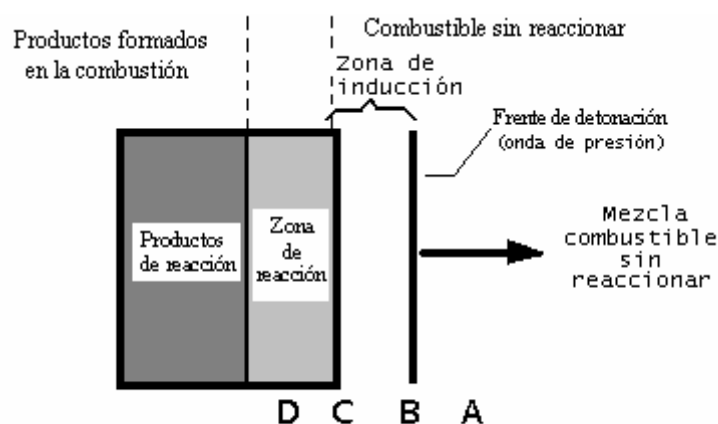


FIGURA 2.9. Esquema de la detonación de una nube de vapor (*Schultz, E. et al, 1999*).

Así, en primer lugar se distingue la mezcla combustible sin reaccionar (A), a la que llega la onda de presión (B), provocando un brusco aumento de la presión. Ésta se mantiene en la zona de inducción, donde las especies se encuentran en un estado de transición previo a la reacción química. A continuación comienza el frente de llama (C), tras el cual tiene lugar la reacción química (D), que genera los productos de reacción.

La evolución de la presión de este proceso en un punto del espacio se puede observar en un diagrama sobrepresión-tiempo, tal y como se muestra en la figura 2.10 (TNO, 1997), donde se han señalado las mismas referencias que en la figura 2.9, para facilitar la comparación entre ambas.

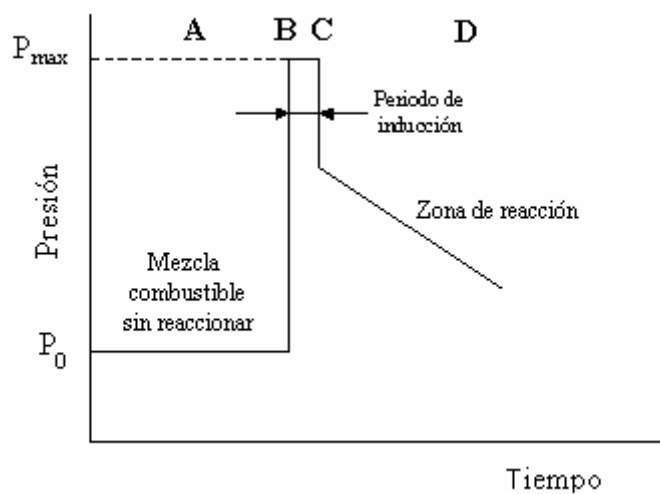


FIGURA 2.10. Perfil presión-tiempo en el que se muestra el periodo de inducción tras el cual se produce la reacción.

Aunque la figura 2.9 muestra un esquema bidimensional, la detonación real es una onda tridimensional. El frente de detonación está constituido por una serie de ondas curvas que forman una estructura celular o multifrente. Los estudios realizados han demostrado la existencia de ondas transversales secundarias que se propagan casi perpendicularmente al frente principal, provocando una estructura curva del frente con grandes discontinuidades en los puntos triples, donde las ondas secundarias se unen al frente principal (Pintgen, F. et al, 2002). El tamaño de estas celdas o células, denominado λ , es representativo de la reactividad de la mezcla, puesto que las más reactivas presentan celdas más pequeñas. Un esquema de la estructura del frente de una onda de detonación se muestra en la figura 2.11, propuesta por van Wingerden et al. (1999).

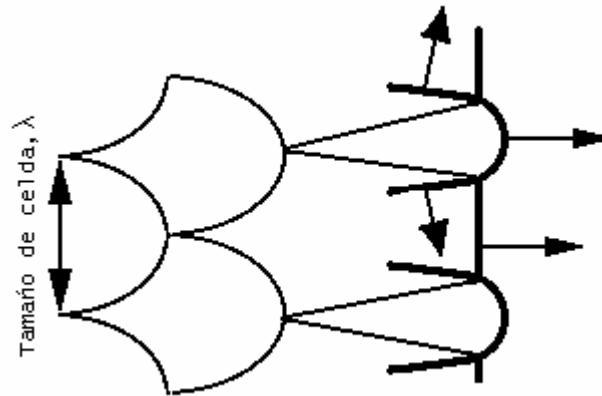


FIGURA 2.11. Estructura del frente de detonación

Contrariamente a la deflagración, la detonación no necesita factores que generen y mantengan la turbulencia. Una vez alcanzado el equilibrio, la onda se desplaza a velocidad constante y puede propagarse a través de espacios no confinados ni obstruidos, siempre que se mantenga una mezcla adecuada entre el combustible y el aire. Si la onda atraviesa una estrecha zona de unos 10-20 cm en la que la mezcla no sea suficientemente buena, no se alcanzará la presión -y temperatura- de autoignición y la detonación no prosperará.

Es importante señalar que la detonación de nubes de vapor en espacios abiertos es un fenómeno insólito del que sólo se tiene un precedente histórico: la explosión de Port Hudson el 7 de diciembre 1970. En aquel accidente concurren una serie de circunstancias especiales que permitieron la formación de una nube densa de propano a nivel de suelo que se extendió por un estrecho valle y con una ignición muy tardía que permitió una excelente mezcla del combustible con el aire (Lees, 1996).

2.4.4. Transición de la deflagración a la detonación

Dependiendo de la energía de la fuente de ignición, la combustión de una nube puede comenzar como deflagración o detonación. Para iniciar la primera, suele ser suficiente con una energía del orden de 10^{-4} J, mientras que la iniciación directa de una detonación requiere niveles de 10^9 J. Debido a lo elevado de este último valor, la detonación directa de una nube es un fenómeno muy poco corriente, por lo que lo habitual es que si se produce lo haga a través de la transición de una deflagración.

Al describir la deflagración, se comentó el proceso de retroalimentación que produce la aceleración de la llama. Si el proceso continúa acelerándose, puede llegar un momento en el que la onda de presión formada alcance un valor

suficientemente alto como para producir la autoignición de los reactivos. En los puntos donde esto ocurra se producen subexplosiones que pueden dar lugar a que se desencadene el proceso detonante que se ha comentado anteriormente (TNO, 1997).

El proceso DDT (transición de la deflagración a la detonación) puede ser dividido en cuatro etapas (Schultz, E. et al, 1999):

- **Iniciación de la deflagración.** Una fuente de ignición de baja energía (por ejemplo, una chispa eléctrica) inicia el fenómeno. Los procesos de liberación de energía del elemento iniciador, así como la producción de radicales y la energía liberada por la combustión compiten con las pérdidas producidas por la expansión de la zona de reacción y por el calor transferido por conducción a los productos formados. Si la energía liberada supera a las pérdidas, la llama seguirá desarrollándose y acelerándose.
- **Aceleración de la llama.** Se produce un aumento en la velocidad de liberación de la energía y comienzan a formarse fuertes ondas de choque, como consecuencia de la posible interacción del frente de llama con obstáculos sólidos, o bien con ondas reflejadas, así como con las especies que se expanden al reaccionar.
- **Formación y amplificación de núcleos de subexplosiones.** Uno o varios núcleos de explosión forman pequeñas zonas de reactantes que alcanzan las condiciones críticas de ignición (este proceso se denomina explosión dentro de la explosión). Las temperaturas críticas se sitúan aproximadamente en 800 y 1200 °C para mezclas combustible-oxígeno y combustible-aire, respectivamente. Estos centros de explosión crean pequeñas ondas explosivas que se amplifican rápidamente en la mezcla circundante.
- **Formación de la onda detonante.** Las ondas explosivas amplificadas y el frente inicial de reacción se combinan para formar un frente de detonación supersónico que se automantiene.

En la figura 2.12 se observa la evolución de la velocidad de reacción con respecto al tiempo en el proceso de transición de la deflagración a la detonación.

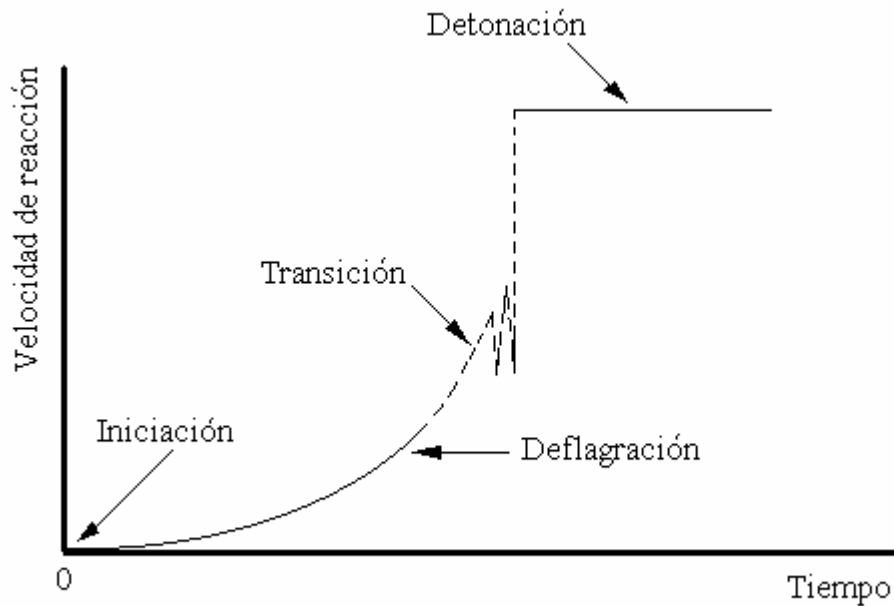


FIGURA 2.12. Transición de la deflagración a la detonación
(López Jimeno et al., 1994).

En cualquier caso, aún quedan algunos aspectos desconocidos con respecto al proceso DDT, como la forma en la que se alcanzan las condiciones críticas necesarias para la formación de las subexplosiones, o cómo se amplifican las ondas explosivas procedentes de las mismas.

2.4.5. La audición de la onda explosiva

Es sabido que los efectos provocados por las detonaciones suelen ser más graves que los de las deflagraciones. Esto se debe a la velocidad a la que es liberada la energía contenida en el combustible. Mientras que en las deflagraciones dicha energía se disipa de forma más suave durante un tiempo mayor, en las detonaciones se produce la liberación súbita en un intervalo de tiempo extremadamente pequeño, lo que permite que se alcancen mayores sobrepresiones y, por tanto, mayores efectos destructivos. Esto se refleja en los diferentes perfiles sobrepresión-tiempo que presentan ambos fenómenos -ver figura 2.1-.

En el caso de la detonación, el tiempo de paso de la onda o duración de la fase positiva (t_p) es mucho menor que en la deflagración. Este parámetro puede asimilarse al semi-período de la onda. Así pues, las ondas detonantes presentan menores períodos y, por tanto, mayores frecuencias que las deflagrantes. Para que el ser humano sea capaz de oír una onda de presión en aire, su frecuencia debe estar comprendida entre 20 Hz y 20 kHz -espectro audible-.

El valor de t_p de una onda deflagrante suele encontrarse alrededor de 400 ms, por lo que el período de la onda es de unos 800 ms, esto es, 2.25 Hz, frecuencia en el campo de los infrasonidos, por lo que el ser humano no percibe sensación sonora.

En el caso de las detonaciones, t_p suele ser del orden de milisegundos; así, suponiendo 1 ms, el período sería de 2 ms y la frecuencia de 500 Hz, valor que se encuentra dentro del espectro de audibilidad y que, por tanto, puede ser percibido por el oído humano.

Por otro lado, el nivel mínimo de presión audible es del orden de $2 \cdot 10^{-5}$ Pa -a 1000 Hz-, muy inferior a los niveles provocados por las detonaciones, incluso a distancias muy alejadas del origen de la explosión. Esto explica el hecho de que numerosos testigos afirmen haber oído la detonación de las explosiones de Enschede (año 2000) o la de Toulouse (año 2001) a unos 30 kilómetros de distancia.

2.5. EL ESTALLIDO DE RECIPIENTES

Las causas por las que se puede producir la rotura de un recipiente son diversas: por debilidad estructural (corrosión, erosión, fatiga, defectos de los materiales), por impactos externos, por aumento de la presión debido a diferentes causas (sobrellenado, reacción fuera de control, explosión interna...) o por combinación de los anteriores fenómenos. Así, el recalentamiento por un incendio externo produciría conjuntamente el incremento de la presión interior del recipiente y el debilitamiento y fallo de los materiales que lo constituyen.

En definitiva, el estallido puede producirse a la presión normal de operación o como consecuencia del aumento de ésta. En este último caso, es sabido que los recipientes a presión poseen dispositivos de seguridad que permiten aliviar la presión interna si ésta supera ciertos límites. La explosión ocurre cuando los sistemas de alivio no son capaces de compensar el aumento de presión o cuando dichos sistemas fallan.

En el momento del estallido la energía del fluido se invertirá en la formación de proyectiles y de una onda de presión. Además, puede producirse otra serie de consecuencias asociadas; así, la fuga de estos productos puede dar lugar a una bola de fuego, una explosión de nube de vapor, un incendio flash o a la formación de una nube tóxica. Que ocurran estas consecuencias dependerá de las características inflamables y tóxicas de los productos contenidos o generados en la combustión y de las circunstancias de cada accidente. Estos efectos asociados al estallido de los recipientes no se contemplan en el presente estudio.

El nivel de la onda de presión y el alcance de los proyectiles formados dependerán de la energía interna del fluido contenido en el recipiente y de cómo ésta se transforma en energía mecánica. La energía interna disponible dependerá de las propiedades termodinámicas y de la cantidad de producto involucrado. Los valores de las magnitudes termodinámicas dependen de las condiciones en las que se encuentre el producto en el momento del estallido, lo que a su vez se relaciona con las circunstancias propias del accidente.

El origen de la energía responsable de la rotura del recipiente puede ser físico o químico (*TNO, 1997*). En el primero, la energía de la explosión se debe a la expansión de un gas comprimido o a la vaporización instantánea de un líquido (BLEVE). En cuanto al segundo grupo, la energía liberada puede proceder de una reacción fuera de control, de la explosión interna de una sustancia explosiva o de una atmósfera inflamable.

2.5.1. Explosiones de origen físico

Expansión de un gas comprimido:

Cuando el recipiente que contiene un gas presurizado explota, la única fuente de energía disponible para la fragmentación y la generación de la onda de presión es la expansión de ese gas. La energía liberada dependerá, por tanto, de las condiciones de almacenamiento, fundamentalmente de la presión y cantidad de sustancia involucrada.

BLEVE:

Una BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) es la explosión de un recipiente que contiene un líquido que se encuentra por encima de su punto de ebullición normal. Cuando el recipiente se rompe, el líquido se vaporiza súbitamente, pasando gran cantidad al estado gaseoso, expandiendo el líquido en ebullición y originando una onda de presión.

Según *Venart et. al. (1993)*, la vaporización puede producirse de forma extremadamente rápida mediante un fenómeno en el que se forman burbujas microscópicas de vapor que crecen en torno a puntos de nucleación tales como impurezas, cristales o iones. Una gran parte del líquido puede vaporizarse en milésimas de segundo, dando lugar a una onda de presión que supera la resistencia del equipo, fenómeno que ha sido denominado BLCBE (Boiling Liquid Compressed Bubble Explosion). Junto al líquido que se vaporiza y que contribuye en gran parte a la formación de la onda de sobrepresión, no hay que olvidar la expansión de la fracción gaseosa presente en el recipiente en el momento del estallido, y que también aporta una cantidad importante de energía a la explosión.

Si el producto implicado es inflamable y durante el suceso alcanza una fuente de ignición, se formará una bola de fuego, produciéndose una elevada emisión de radiación térmica. Es frecuente que el fenómeno BLEVE vaya asociado a una bola de fuego, dado que la causa inicial más frecuente es la acción de un incendio externo (*González Ferradás et al., 2002*).

En las explosiones BLEVE de tanques cilíndricos horizontales, los fragmentos pueden alcanzar distancias considerables.

Transición rápida de fase:

Aunque este fenómeno no ocurre exclusivamente en el interior de recipientes, se ha incluido en esta sección, ya que es frecuente que así suceda.

La transición rápida de fase puede ocurrir cuando dos líquidos con temperaturas de ebullición muy diferentes entran en contacto. Si se trata de un líquido caliente y de alto punto de ebullición que contacta con uno frío de bajo punto de ebullición, se produce un rápido cambio de fase en este último, produciendo una expansión volumétrica que genera una onda que impulsa a la mezcla, esparciéndola fuera del recipiente.

La tabla 2.7 recoge algunas parejas de líquidos que pueden dar lugar a este fenómeno.

TABLA 2.7. Sistemas en los que puede ocurrir la transición rápida de fase.

Fluido frío	Fluido caliente
Agua	Metales fundidos (aluminio, acero, níquel, magnesio, titanio, wolframio, cobre), sales fundidas, hidrocarburos pesados o aceites calientes
Hidrocarburos ligeros	Hidrocarburos pesados o aceites calientes
Gases licuados	Agua y otros líquidos de similar punto de ebullición.

La onda de sobrepresión que puede originar la transición rápida de fase está limitada por la energía puesta en juego en la vaporización. Sólo una pequeña fracción de la energía de cambio de estado es transferida a la onda, de manera que en términos energéticos una transición rápida de fase es mucho menos eficiente que un explosivo en la generación de ondas de presión.

Este fenómeno es un caso poco frecuente de explosión en la industria, ya que solamente ocurre en condiciones especiales.

2.5.2. Explosiones de origen químico

Reacciones fuera de control:

Una reacción fuera de control se produce cuando se forman productos distintos a los esperados debido a contaminación de los reactivos, fallos en el control de temperatura, error de carga de materias primas, etc. La explosión se produce cuando el calor se libera más rápidamente de lo que los sistemas de refrigeración pueden absorber y generalmente producen un crecimiento exponencial de la temperatura que lleva asociada una fuerte elevación de la presión. Para evitarlo se usan sistemas de amortiguación, enfriamiento rápido o alivio, tales como discos de ruptura o válvulas de seguridad; en el caso de que estos sistemas fallen, o no sean capaces de despresurizar el recipiente a la velocidad adecuada, se produce la explosión.

Descomposición de un material energético:

La descomposición de una sustancia en el interior de un recipiente puede dar lugar al estallido del mismo. Se trata de sustancias que se descomponen con formación de productos gaseosos, como explosivos sólidos y otras sustancias en fase líquida y gaseosa que contienen grupos especialmente inestables (compuestos azo, diazo, diaceno, compuestos de diazonio, nitrocompuestos, nitratos/nitritos de alquilo/acilo, moléculas con enlaces peróxido, epóxidos, derivados del acetileno, fulminatos metálicos, etc. (*Santamaría et al. (1999)*). El comportamiento y las consecuencias son más parecidos a las de la detonación de un explosivo que a las típicas del estallido de un recipiente.

Explosión interna de atmósferas inflamables:

Los tipos de atmósferas inflamables que potencialmente pueden dar lugar a explosiones son tres: mezclas de aire y gases combustibles, aire cargado de polvo de un material combustible y aire que contiene un aerosol de un líquido inflamable.

En el apartado 2.3 se han comentado los mecanismos de deflagración y detonación de nubes de gases, por lo que se indica aquí los correspondientes a las explosiones de polvo y aerosol.

Las explosiones de polvo ocurren en la mayoría de los casos en espacios muy confinados, tales como silos o depósitos, siendo frecuente la participación de cereales y derivados o sustancias inestables. El fenómeno de la generación de la onda de presión es un proceso progresivo, que comienza con la ignición y combustión lenta de la mezcla. En el momento de la ignición, el avance del frente de llama es laminar, pero a medida que la combustión continúa, el avance se

acelera favorecido por la turbulencia creada por la expansión de los gases generados (*Proust, 1996 y Vogl, 1995*). A medida que la velocidad del frente de llama aumenta, la sobrepresión producida va creciendo, hasta que llega un momento en el que la presión permite la autoignición de la mezcla que está inmediatamente por delante del frente de avance de la explosión. En este momento se produce la transición de la deflagración a la detonación, que proseguirá por el recipiente o conducto hasta encontrar un punto de liberación al exterior, normalmente una válvula de seguridad o un disco de ruptura, o bien produce el estallido del contenedor.

Las explosiones de aerosoles son menos frecuentes y menos estudiadas que las de gases y polvo (*IChemE, 1994*). La circunstancia que hace menos probable las explosiones de aerosoles es la dificultad para la formación y mantenimiento de éstos. Las partículas de aerosol siempre estarán acompañadas de la fase vaporizada en equilibrio con el líquido; en este sentido, la mezcla puede considerarse como una nube de vapor con las características especiales que le confiere la presencia de partículas líquidas. *Kopyt et al. (1989)* indican que en las nubes de aerosoles, la elevada velocidad de avance del frente de llama es debida a una combinación de factores tales como la turbulencia, la heterogeneidad, la alta densidad de la mezcla combustible y el precalentamiento de las gotículas por radiación térmica.

2.6. LA PROYECCIÓN DE FRAGMENTOS

El estallido de los contenedores provoca la proyección de fragmentos que en muchas ocasiones alcanzan distancias considerables y causan daños importantes al impactar contra seres humanos, edificios o estructuras.

Los fragmentos provocados por las explosiones pueden ser primarios (generados por la rotura del recipiente afectado) o secundarios, como consecuencia de los efectos de ondas de presión externas sobre equipos o estructuras que provocan su rotura y la formación de fragmentos de edificaciones (muros, tejados,...) o equipos (tuberías, contenedores, estructuras de soporte,...). Su desprendimiento y aceleración dependen de su ubicación, masa y dimensiones, así como de los parámetros característicos de la onda de presión (sobrepresión e impulso) (*ICChemE, 1994*). La formación y proyección de los fragmentos secundarios está considerada como un efecto dominó y la determinación del número y alcance de los mismos presenta una gran incertidumbre, no incluyéndose en este trabajo.

El número de fragmentos formados en la rotura de un recipiente varía ampliamente, dependiendo de las causas de la rotura, de la geometría del contenedor y de las condiciones de almacenamiento. Las roturas de los recipientes se clasifican en dúctiles y frágiles. Las primeras, que son las más frecuentes en la industria (*Lees, 1996*), producen pocos fragmentos de gran tamaño, con un elevado potencial para producir daños. Las fracturas frágiles producen fragmentos de menor tamaño.

En el caso de roturas por debilitamiento del material suelen formarse escasos fragmentos (normalmente 2 en los cilindros y entre 2 y 5 en las esferas). Si, por el contrario, la rotura se produce por sobrepresión interna, la estimación del número y masa de los fragmentos debe basarse en la experiencia.

La rotura de **recipientes esféricos** suele producir un número elevado de fragmentos de tamaño más o menos similar. *Hauptmanns (2001b)* lo establece entre 3 y 19, con valores medios entre 8 y 10. *Wang et al. (2000)*, analizando un accidente real donde se produjo la rotura de una esfera que contenía etileno, observaron la formación de siete fragmentos. *TNO (1997)* recomienda suponer un número de fragmentos entre 10 y 20. *Lees (1996)* recoge datos de rotura de dos esferas en las que se generaron 14 y 35 fragmentos, respectivamente. En la figura 2.13 se indican las roturas más habituales de estos recipientes.

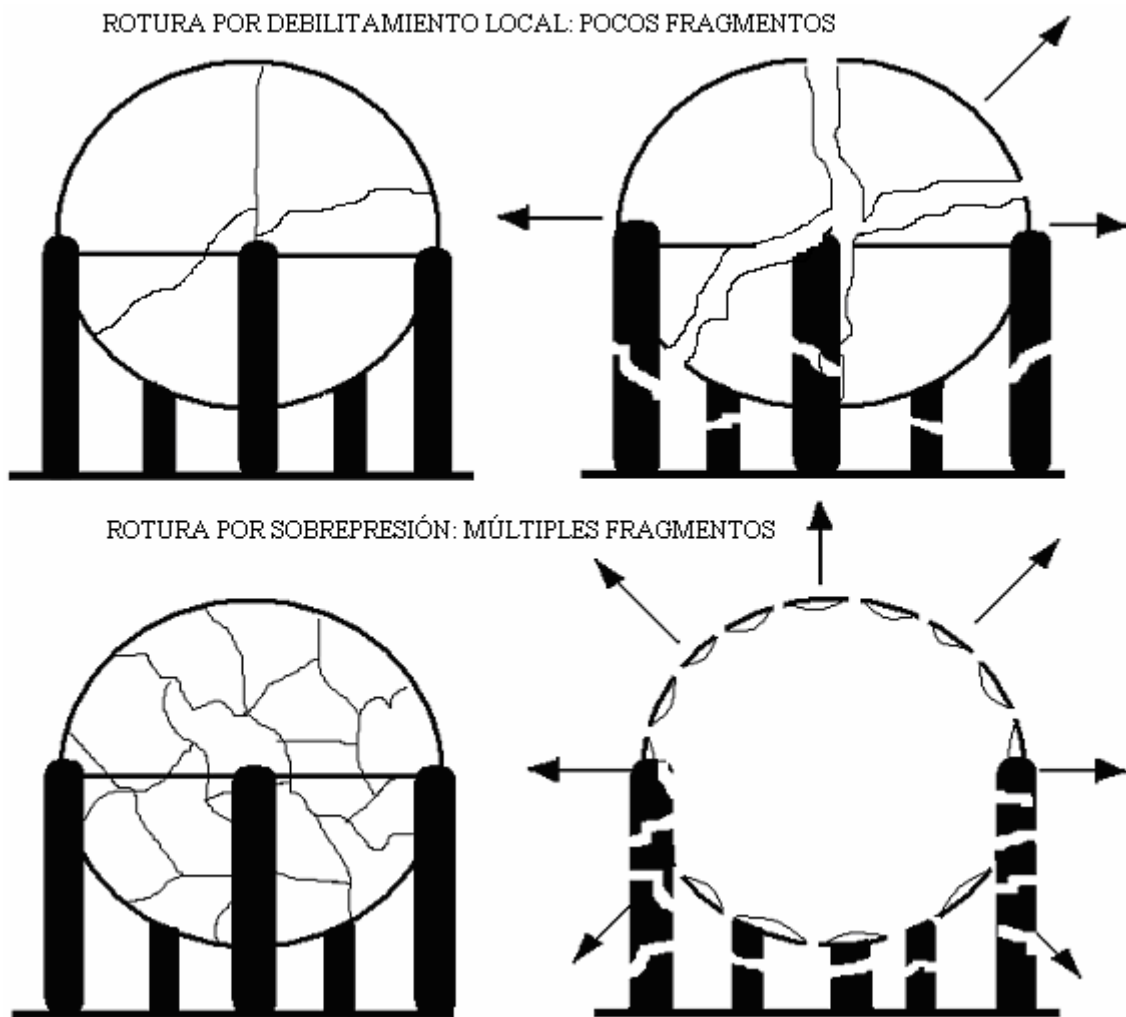


FIGURA 2.13. Tipos de roturas de recipientes esféricos

En los **recipientes cilíndricos**, la rotura inicial se produce normalmente en dirección axial, aunque ésta suele continuar de forma circular, provocando la aceleración y lanzamiento de los extremos semiesféricos. Es habitual que los cilindros experimenten roturas dúctiles cerca de uno de los extremos (originando dos fragmentos) o por ambos (originando tres), aunque en alguna ocasión también se ha observado la rotura frágil, originando gran número de ellos -figura 2.14-. Así, *Hauptmanns (2001a)* estima, basándose en los análisis realizados por Baker, Holden y Reeves, que el número medio de fragmentos originados por recipientes cilíndricos es de 2.7, mientras que *Baum (2001)* observa que de los 6 ensayos realizados, la mitad de las roturas produjeron dos fragmentos, mientras que en la otra mitad se generaron tres. En un accidente descrito por *Planas-Cuchi et al. (2004)*, el recipiente se rompió en tres fragmentos. No obstante, *Lees (1996)* analiza accidentes donde los recipientes cilíndricos se rompieron en un gran número de fragmentos (de diez a treinta).

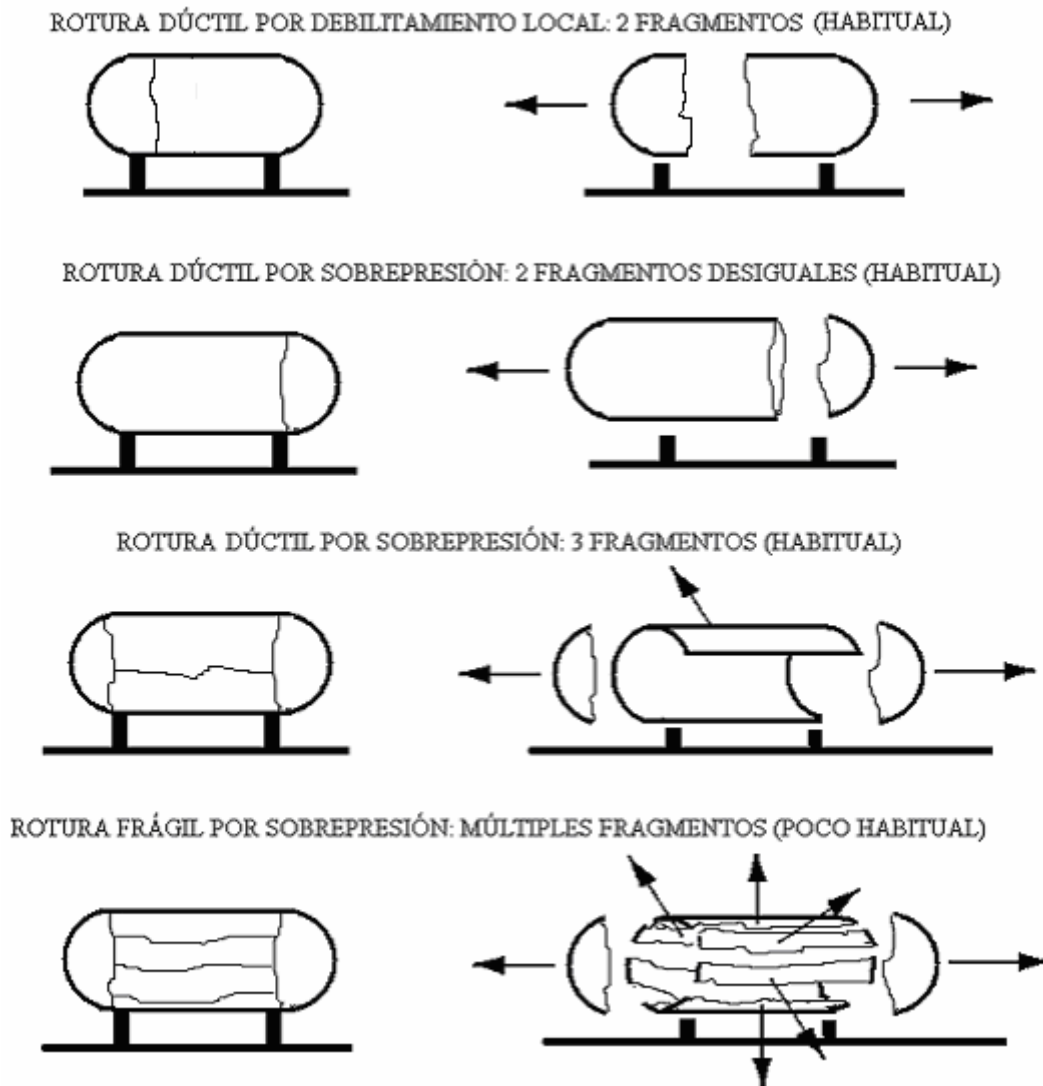


FIGURA 2.14. Tipos de roturas de recipientes cilíndricos

Para conocer el alcance de los fragmentos producidos en el estallido de recipientes es necesario estimar la velocidad inicial de los mismos y las condiciones aerodinámicas de su desplazamiento por el aire. La velocidad inicial es consecuencia de la aceleración provocada por dos fuerzas diferentes. Una es consecuencia de la diferencia de presiones del interior del recipiente y la atmosférica; la otra es la producida por la presión dinámica, o viento de la explosión. En la práctica, la fuerza debida a la diferencia de presiones actúa durante un tiempo muy corto, por lo que la aceleración de los fragmentos es debida principalmente al viento de la explosión (*Lees, 1996*).

En el anexo I se describe una metodología para estimar el alcance de los fragmentos producidos en el estallido de recipientes.

CAPÍTULO 3. EFECTOS DE LAS EXPLOSIONES

Los efectos de la sobrepresión, del impulso y de los fragmentos sobre los seres humanos y las estructuras son diversos y dependen de sus niveles de incidencia, resultando importante definirlos para estimar las consecuencias que pueden provocar.

3.1. EFECTOS SOBRE LOS SERES HUMANOS

Los efectos directos que una onda de presión puede ejercer sobre los seres humanos y que se relacionan con la sobrepresión y el impulso afectan en primer lugar a los denominados “órganos blandos”, fundamentalmente el tímpano y el pulmón, pero además cabe destacar los posibles daños derivados del desplazamiento y colisión del cuerpo contra objetos o estructuras.

3.1.1. Daño al tímpano

Glasstone (1962) y *White (1968)* (citados por *Lees, 1996*) han estudiado los daños que una explosión puede ocasionar sobre el tímpano. En general, han encontrado que la probabilidad del daño no depende de la duración de la fase positiva de la onda y, por consiguiente, del impulso, obteniéndose resultados similares para ondas de corta y larga duración.

Mediante las funciones PROBIT (*Finney, 1971*) -anexo IV- se puede relacionar el porcentaje de elementos afectados por un determinado tipo de daño, en función de las magnitudes que lo provocan. Con relación a la rotura timpánica provocada por explosiones, *Fugelso, Weiner y Schiffman (Lees, 1996)* proponen el PROBIT de la ecuación 3.1 para estimar el porcentaje de humanos que puede resultar afectado:

$$Y = -15.6 + 1.93 \ln P_s \quad (3.1)$$

Es más utilizada la expresión dada por *Hirsch*, al ser el resultado de una recopilación de información de explosiones reales - *Valdala (1930)*, *Henry (1945)* y *Reider (1968)*, citados por *Lees (1996)* y *TNO (1989)*.- Estos datos han sido representados por *Hirsch (1968)* en la figura 3.1, de la cual se deduce la ecuación PROBIT siguiente:

$$Y = -12.6 + 1.52 \ln P_s \quad (3.2)$$

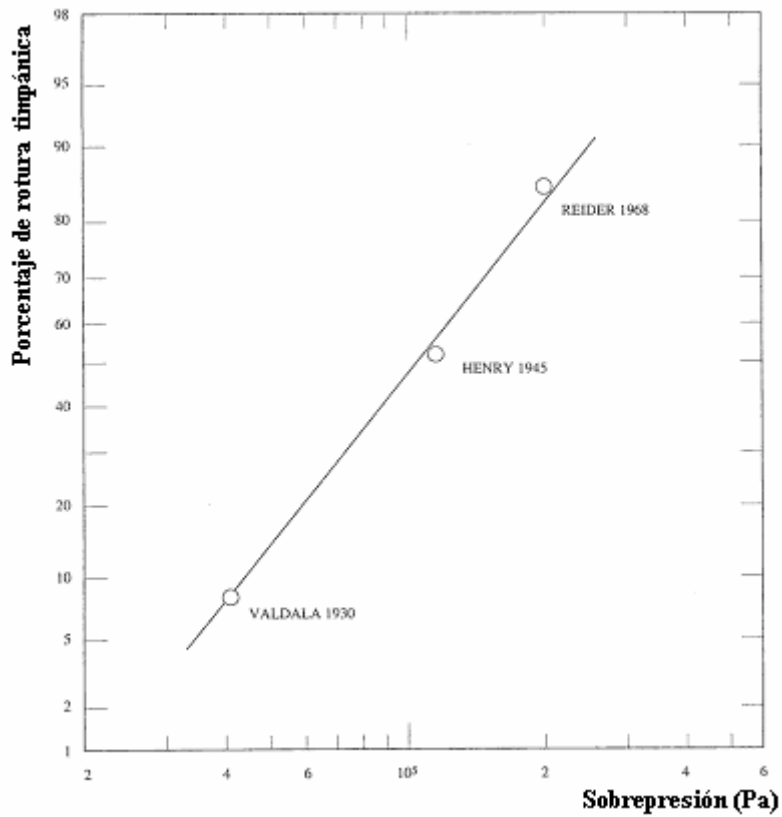


FIGURA 3.1. Porcentajes de rotura timpánica frente a la sobrepresión producida en explosiones (Hirsch, 1968)

Mediante la ecuación 3.2 y la tabla IV.1 (anexo IV), pueden obtenerse las líneas de isorriesgo correspondientes a distintas probabilidades de rotura timpánica, como se muestra en la figura 3.2, donde se observa que el daño no depende del impulso mecánico de la onda.

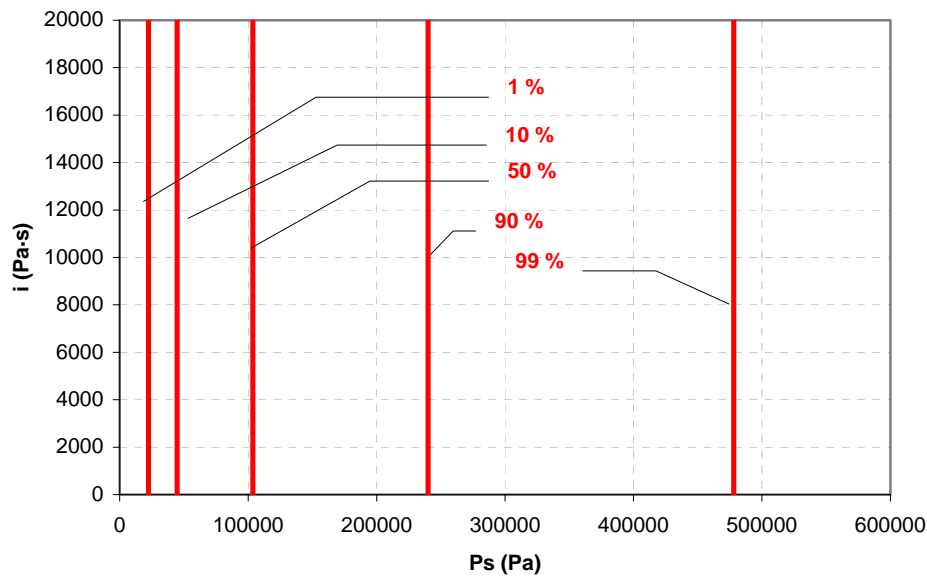


FIGURA 3.2. Porcentajes de rotura del tímpano en función de la sobrepresión de la onda explosiva, según la ecuación 3.2 y la tabla IV.1 (anexo IV).

3.1.2. Daño al pulmón

Este efecto depende de la sobrepresión y de la duración de la fase positiva de la onda y, por consiguiente, del impulso. Algunos investigadores -*White et al. (1971)* y *Clemedson y Jönson (1976)*- han modelizado el conjunto tórax-pulmón como un sistema masa-muelle, para extrapolar los resultados obtenidos con animales a los seres humanos (*TNO, 1989*).

Dependiendo de la posición relativa del individuo frente a la onda, la presión efectiva ejercida sobre su caja torácica es diferente. Pueden distinguirse tres casos, tal y como se muestra en las figuras 3.3 a 3.5. (*Bowen et al, 1968*, citados por *TNO, 1989*).

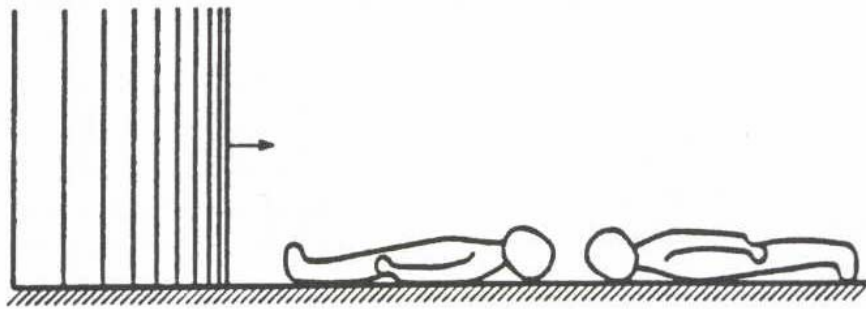


FIGURA 3.3. *Cuerpo humano en posición tendida, que ofrece la mínima resistencia a la onda*

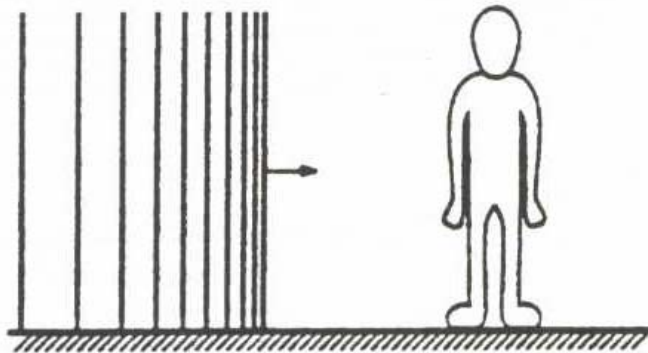


FIGURA 3.4. *Cuerpo humano de pie, que ofrece la máxima resistencia a la onda*

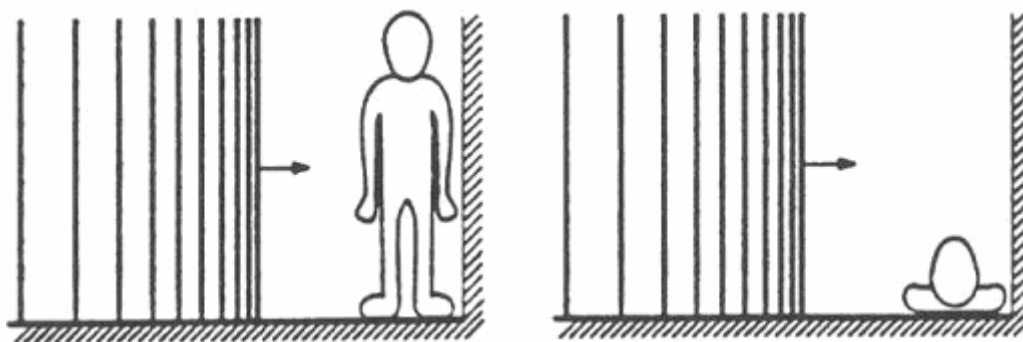


FIGURA 3.5. *Cuerpo humano de pie o tendido, junto a una estructura que provoque la reflexión de la onda*

En el primer caso (figura 3.3), el individuo se sitúa en terreno libre y sin estructuras rígidas cercanas, de forma que ofrece la mínima resistencia a la onda. El eje longitudinal del individuo es paralelo a la dirección de avance. En este

caso, la presión que actúa sobre la caja torácica (P_{ef}) coincide con el valor de la sobrepresión estática (P_s):

$$P_{ef} = P_s \quad (3.3)$$

En el segundo caso (figura 3.4), la dirección de la onda es perpendicular al eje principal del individuo, ofreciendo resistencia al avance de la onda. La presión efectiva es la suma de la sobrepresión estática (P_s) y la presión dinámica (Q):

$$P_{ef} = P_s + Q \quad (3.4)$$

En el tercer caso (figura 3.5), el individuo está situado en las inmediaciones de una estructura rígida que refleja la onda. Tal y como se indica en el capítulo 2, la sobrepresión de la onda reflejada es siempre superior a la estática en la zona cercana al obstáculo (*TNO, 1989*). En este caso, es indiferente que el individuo se encuentre ofreciendo resistencia o no al avance de la onda, ya que el parámetro que más le afecta es la presión reflejada (P_r):

$$P_{ef} = P_r \quad (3.5)$$

Anteriormente se ha comentado que el daño producido por una onda de presión sobre los pulmones depende de la sobrepresión y del impulso, por lo que se han establecido correlaciones entre ambas magnitudes y la probabilidad de muerte por hemorragia pulmonar, aunque debe tenerse en cuenta la masa corporal del individuo. Así, *Baker et al. (1983)* proponen la siguiente función PROBIT:

$$Y = 5.0 - 5.74 \ln \left(\frac{4.2}{P'} + \frac{1.3}{i_{esc}} \right) \quad (3.6)$$

donde P' (adimensional) es la presión escalada e i_{esc} ($\text{Pa}^{1/2} \cdot \text{s} / \text{kg}^{1/3}$) es el impulso escalado, definiéndose estos parámetros según las expresiones 3.7 y 3.8:

$$P' = \frac{P_{ef}}{P_o} \quad (3.7)$$

$$i_{esc} = \frac{i}{P_o^{1/2} m^{1/3}} \quad (3.8)$$

P_{ef} es la presión que actúa sobre el individuo (Pa), P_o la presión atmosférica (Pa), i el impulso mecánico (Pa·s) y m la masa corporal (kg).

En la tabla 3.1 se indican otras ecuaciones PROBIT propuestas en la bibliografía, que relacionan la mortalidad por hemorragia pulmonar con las magnitudes anteriores.

TABLA 3.1. Ecuaciones PROBIT para muerte por daño al pulmón por ondas de presión.

Ecuación	Fuente
$Y = 5 - 5.74 \ln \left(\frac{4.2 \cdot 10^5}{P_{ef}} + \frac{1694}{i} \right) \quad (3.9)$	<i>Baker et al, 1983 citado por TNO (1989)</i>
$Y = 5 - 6.6 \ln \left(\frac{620550}{P_s} + \frac{2069}{i} \right) \quad (3.10)$	<i>Prugh (1999)</i>
$Y = 5 - 6.91 \ln \left(\frac{144795}{P_s} \right) \quad (3.11)$	<i>Fugelso, Weiner y Schiffman, citados por Lees (1996)</i>

La ecuación 3.6 aplicada a una persona de 70 kg de masa corporal da como resultado la 3.9, deducida para ondas detonantes. Las explosiones no detonantes dan lugar a consecuencias menos graves (*White, Jones, Damon, 1971*), pero no se han encontrado referencias que relacionen el daño y los parámetros anteriores para este caso, por lo que la utilización de la ecuación 3.6 supone una sobreestimación de la probabilidad de muerte por hemorragia de pulmón.

Utilizando la ecuación 3.9 y la relación entre el PROBIT y el porcentaje de elementos afectados (tabla IV.1 del anexo IV) se obtiene la figura 3.6, que relaciona la presión efectiva y el impulso para diversos porcentajes de letalidad.

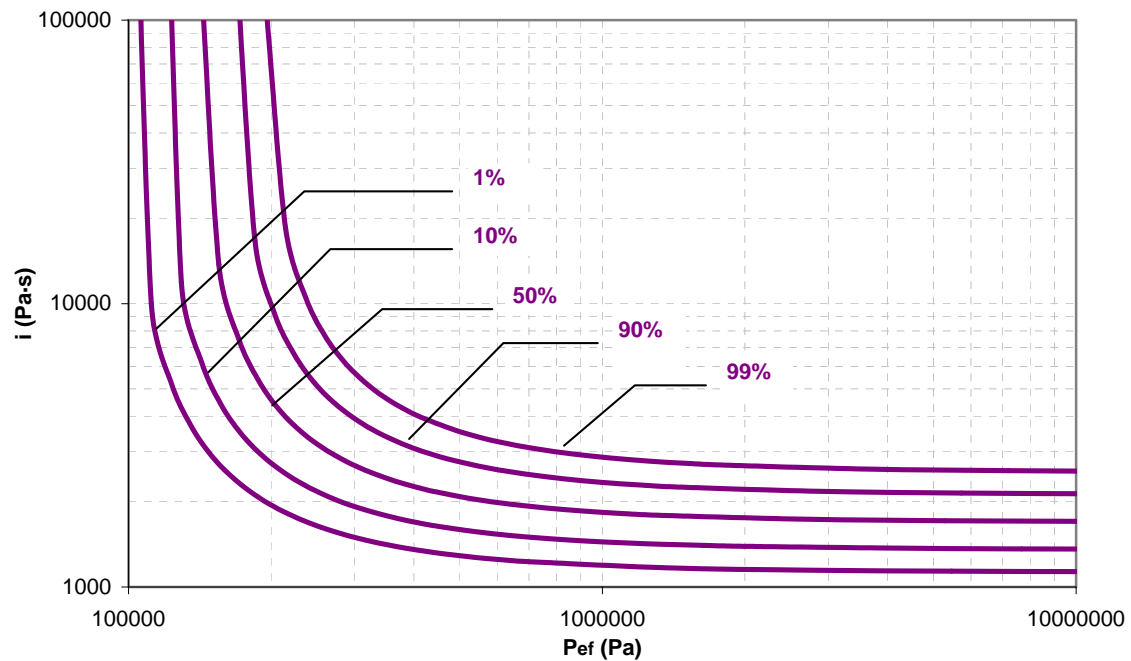


FIGURA 3.6. Líneas de isorriesgo (%) para hemorragia pulmonar provocada por explosiones, obtenidas mediante la ecuación 3.9 y la tabla IV.1 (anexo IV).

Cuando la duración de la fase positiva de la onda es grande, sólo la sobrepresión es importante. En el caso contrario, cuando la duración es pequeña, sólo el impulso es el causante del daño. Este comportamiento doblemente asintótico del impulso mecánico y de la sobrepresión se ha observado también para los efectos provocados en las estructuras por las ondas de presión (ver figura 3.8).

3.1.3. Daño por desplazamiento e impacto del cuerpo

La sobrepresión provoca un impulso que arrastra los objetos expuestos a la onda. Si ésta alcanza a un individuo en la posición de la figura 3.4, probablemente caerá al suelo y será desplazado a cierta velocidad, pudiendo impactar con objetos o estructuras rígidas que pueden provocarle daños más graves que los derivados de la caída inicial.

Baker et al. (1983) proponen funciones PROBIT que relacionan directamente la sobrepresión de la onda y el impulso con la probabilidad de muerte por impacto del cráneo y de todo el cuerpo (suponiendo que el individuo es sorprendido de pie en terreno libre con obstáculos cercanos contra los que pueda golpearse).

La función PROBIT propuesta por *TNO (1989)* para daño letal por impacto con el cráneo es:

$$Y = 5 - 8.49 \ln S \quad (3.12)$$

donde:

$$S = \frac{2.43 \cdot 10^3}{P_s} + \frac{4 \cdot 10^8}{P_s \cdot i} \quad \text{Válido para } P_s < 4 \cdot 10^5 \text{ Pa} \quad (3.13)$$

La función PROBIT para muerte por impacto con todo el cuerpo es la siguiente (*TNO, 1989*):

$$Y = 5 - 2.44 \ln S \quad (3.14)$$

donde:

$$S = \frac{7.38 \cdot 10^3}{P_s} + \frac{1.3 \cdot 10^9}{P_s \cdot i} \quad \text{Válido para } P_s < 4 \cdot 10^5 \text{ Pa} \quad (3.15)$$

Las funciones anteriores se representan en la figura 3.7 en forma de isolíneas de probabilidad de daño. Para una probabilidad de daño dada puede observarse que las combinaciones de los valores de la sobrepresión y del impulso para el impacto con todo el cuerpo son muy superiores a las respectivas para el impacto con el cráneo, dada la mayor vulnerabilidad de este último.

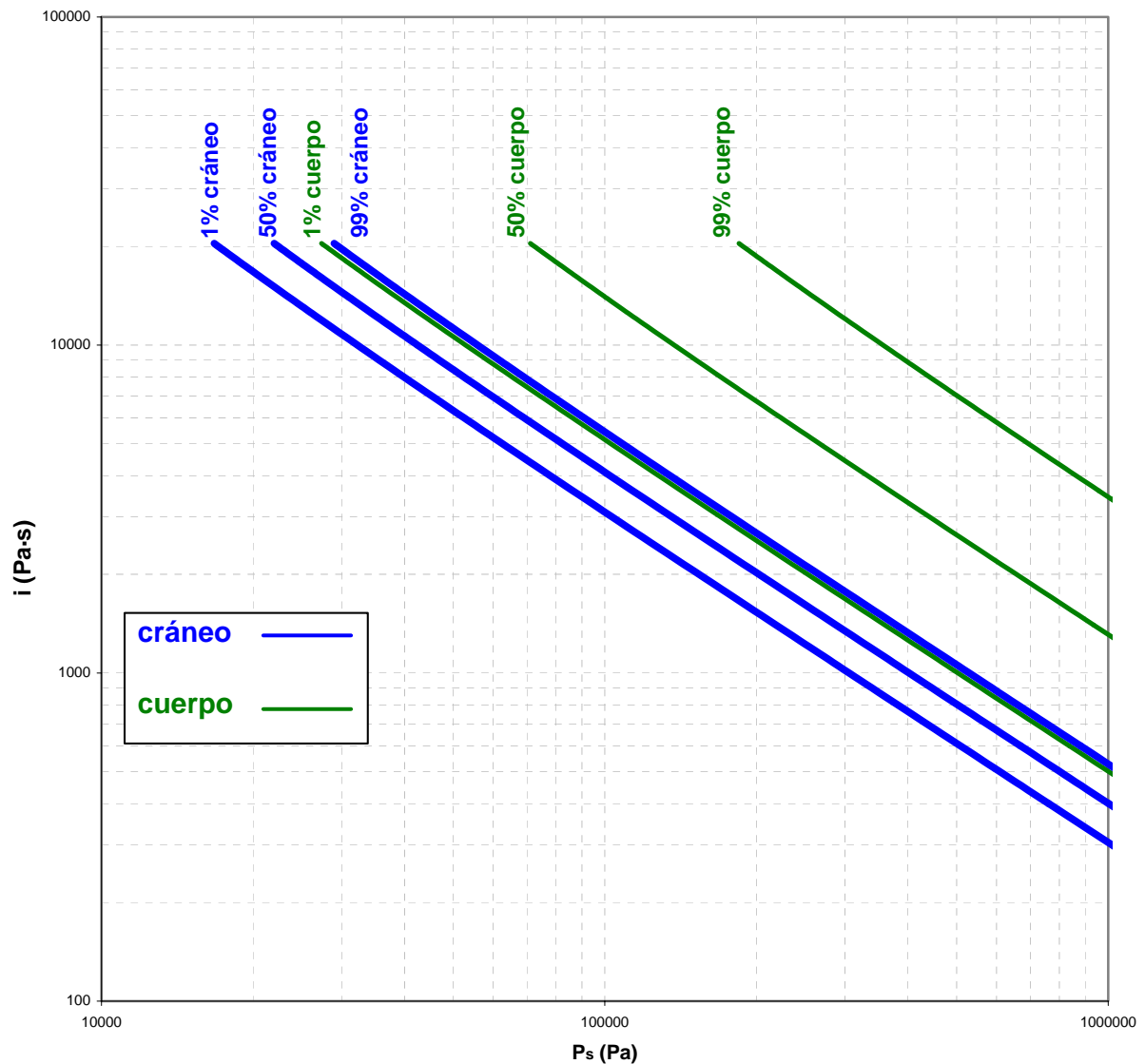


FIGURA 3.7. Líneas de isorriesgo (%) para muerte por desplazamiento e impacto con el cráneo o con el cuerpo, obtenidas a partir de las ecuaciones 3.12 y 3.14, respectivamente

3.1.4. Ecuaciones PROBIT seleccionadas para el análisis del daño a los seres humanos

La metodología PROBIT es la más adecuada y reconocida para el análisis de los efectos producidos por determinadas magnitudes peligrosas (en este caso, la sobrepresión y el impulso de la onda explosiva), dado que es la forma más realista de relacionar el valor de las citadas magnitudes con el porcentaje de elementos afectados para cada uno de los diferentes tipos de daño. En la tabla 3.2 se recogen algunas de las funciones PROBIT publicadas, seleccionándose las más importantes:

TABLA 3.2. Principales ecuaciones PROBIT para los efectos que se citan

Efecto	Ecuación	Fuente
Rotura de tímpano	$Y = -15.6 + 1.93 \ln P_s \quad (3.1)$	<i>Fugelso, Weiner y Schiffman (1972), citados por Lees (1996)</i>
	$Y = -12.6 + 1.52 \ln P_s \quad (3.2)$	<i>Vadala (1930), Henry (1945) y Reider (1968), citados por TNO (1989), Contini et. al (1993), Lees (1996)</i>
Muerte por hemorragia pulmonar	$Y = 5 - 5.74 \ln \left(\frac{4.2 \cdot 10^5}{P_{ef}} + \frac{1694}{i} \right) \quad (3.9)$	<i>Bowen, Fletcher y Richmond (1968) y Baker et. al (1983), citados por TNO (1989), Contini et. al (1993), Lees (1996), Prugh (1999).</i>
	$Y = 5 - 6.6 \ln \left(\frac{620550}{P_s} + \frac{2069}{i} \right) \quad (3.10)$	<i>Prugh (1999)</i>
	$Y = 5 - 6.91 \ln \left(\frac{144795}{P_s} \right) \quad (3.11)$	<i>Fugelso, Weiner y Schiffman (1972), citados por Lees (1996)</i>
Muerte por desplazamiento e impacto con todo el cuerpo	$Y = 5 - 2.44 \ln \left(\frac{7.38 \cdot 10^3}{P_s} + \frac{1.3 \cdot 10^9}{P_s i} \right) \quad (3.16)$	<i>TNO (1989), Contini et. al (1993), Lees (1996), Prugh (1999)</i>
	$Y = 5 - 4.82 \ln \frac{40267}{i} \quad (3.17)$	<i>Prugh (1999)</i>
Muerte por desplazamiento e impacto con el cráneo	$Y = 5 - 8.49 \ln \left(\frac{2430}{P_s} + \frac{4 \cdot 10^8}{P_s i} \right) \quad (3.18)$	<i>Baker (1983), citados por TNO (1989), Contini et. al (1993), Lees (1996)</i>

Para rotura timpánica. De las dos ecuaciones PROBIT propuestas, la más referenciada es la 3.2. *Lees (1996)* indica que la utilización de la ecuación 3.1 suele conducir a niveles de daño sobreestimados. También se ha comprobado que la ecuación 3.2 concuerda mejor con los datos experimentales dados por otros autores (por ejemplo, *Glasstone (1962)* y *White (1968)*, citados por *Lees (1996)*, *Bowen (1968)* citado por *Galbraith, K. (1998)* y las curvas de *Baker*, recogidas por *Aguilar Bartolomé (1978)*), lo que justifica la selección de la misma.

Para muerte por hemorragia de pulmón. De las tres ecuaciones indicadas en la tabla 3.2, la 3.11 depende exclusivamente de la sobrepresión, por lo que no permite analizar el efecto conjunto de las dos magnitudes peligrosas (sobrepresión e impulso), descartándose su utilización. De las restantes, la 3.9 es la más citada en la bibliografía, siendo la seleccionada aquí.

Para muerte por desplazamiento e impacto con el cuerpo. De las dos propuestas, se ha seleccionado la ecuación 3.16, al ser la más referenciada.

Para muerte por desplazamiento e impacto con el cráneo, la ecuación 3.18 es la única publicada, concordando bien con los datos proporcionados por *Aguilar Bartolomé (1978)*.

3.1.5. Daño producido por el impacto de fragmentos sobre los seres humanos

Los fragmentos formados en las explosiones se clasifican en penetrantes (que perforan y penetran en el cuerpo) y no penetrantes (que provocan daño por la presión del impacto). Los modos de acción citados dependen de la masa, velocidad y área transversal de los mismos.

TNO (1989) propone ecuaciones PROBIT que relacionan la masa y la velocidad de los fragmentos con la probabilidad de supervivencia en el caso de impacto. Para fragmentos de más de 4.5 kg de masa, el impacto con una velocidad inicial de 4.5 m/s provoca la mortalidad del 1% de la población, pero si la velocidad es de 7 m/s, el porcentaje de mortalidad es del 99%, indicando además que los fragmentos con una energía cinética a partir de 40 ó 60 J pueden ocasionar lesiones graves. Como se observa en la tabla 3.6, los fragmentos que se forman por el estallido de los recipientes utilizados en la industria son de tamaño y velocidad considerables, superando ampliamente la masa, velocidad y energía cinética indicadas, de manera que su impacto sobre los seres humanos suele ocasionar daños muy graves, incluso la muerte. Por ello, la distancia de intervención propuesta en el capítulo 5 se toma en función del alcance máximo de los fragmentos, que en muchas ocasiones supera el alcance peligroso de las ondas de presión.

3.2. EFECTOS SOBRE LAS ESTRUCTURAS

Al igual que ocurre con los daños ocasionados a los humanos, los provocados por las ondas sobre las estructuras dependen de la sobrepresión, del impulso y de la formación de proyectiles. En el nivel de gravedad influye también la orientación respecto a la dirección de avance de la onda, la geometría de la estructura (relación altura / longitud) y los materiales de construcción.

Para la planificación de emergencias interesa considerar los edificios habitados, debido a la mayor gravedad de las consecuencias. Cabe señalar que, en general, los edificios son más sensibles a las explosiones que los seres humanos expuestos directamente a las mismas. En la tabla 3.3 (*Lees, 1996*) se muestran los efectos que determinadas combinaciones sobrepresión-impulso provocan sobre edificaciones con paramentos de ladrillo.

TABLA 3.3. Efectos de la sobrepresión y del impulso en edificios con paramentos de ladrillo (*Wilton (1970), Gabrielsen (1973), Glasstone (1957), citados por Lees (1996)*)

Porcentaje de daño	Descripción del daño	Sobrepresión (Pa)	Impulso (Pa·s)
80 %	Parcialmente demolido	35000	12800
40 %	Daño severo. Requiere demolición	34500	12100
25 %	Daño moderado. Reparable.	27600	11200
10 %	Daño leve. Reparable	18600	2300
		18000	7900
		13100	5800
		12400	6200
		11700	5800
		11000	1100
		9000	3200

3.2.1. Ecuaciones PROBIT seleccionadas para el análisis del daño a los edificios

Dado que las consecuencias de una explosión sobre los edificios dependen conjuntamente de la sobrepresión y del impulso, el análisis de los efectos conviene hacerlo de nuevo con las ecuaciones PROBIT, siendo las más utilizadas las incluidas en la tabla 3.4, propuestas por *TNO (1989)* y *Contini (1993)*, que predicen daños estructurales menores, mayores y el colapso de los edificios. Los valores de sobrepresión e impulso que se deducen de estas expresiones

concuerdan bien con los datos experimentales aportados por *Glasstone (1957)*, *Wilton (1970)* y *Gabrielsen (1973)* citados en la tabla 3.3, así como con los recogidos por *Aguilar Bartolomé (1978)*, *IChemE (1989)*, *Bjerketvedt et al. (1992)* y *Galbraith, K. (1998)*.

TABLA 3.4. Niveles de daños estructurales en edificaciones debidos a explosiones y ecuaciones PROBIT más utilizadas (*TNO, 1989*)

Categoría	Daño	
1	Estructural menor (rotura de ventanas, desplazamiento de puertas y marcos, daños a tejados).	
	Ecuación PROBIT:	$Y = 5 - 0.26 \ln \left[\left(\frac{4600}{P_s} \right)^{3.9} + \left(\frac{110}{i} \right)^5 \right] \quad (3.19)$
2	Estructural mayor (además de los efectos anteriores, fractura y/o destrucción de algunas paredes).	
	Ecuación PROBIT:	$Y = 5 - 0.26 \ln \left[\left(\frac{17500}{P_s} \right)^{8.4} + \left(\frac{290}{i} \right)^{9.3} \right] \quad (3.20)$
3	Colapso (demolición parcial o total del edificio).	
	Ecuación PROBIT:	$Y = 5 - 0.22 \ln \left[\left(\frac{40000}{P_s} \right)^{7.4} + \left(\frac{460}{i} \right)^{11.3} \right] \quad (3.21)$

Mediante los PROBIT de la tabla 3.4 se representan en la figura 3.8 las líneas de isorriesgo correspondientes al 1%, 50% y 99% de edificaciones afectadas, para los niveles de daño estructural citados.

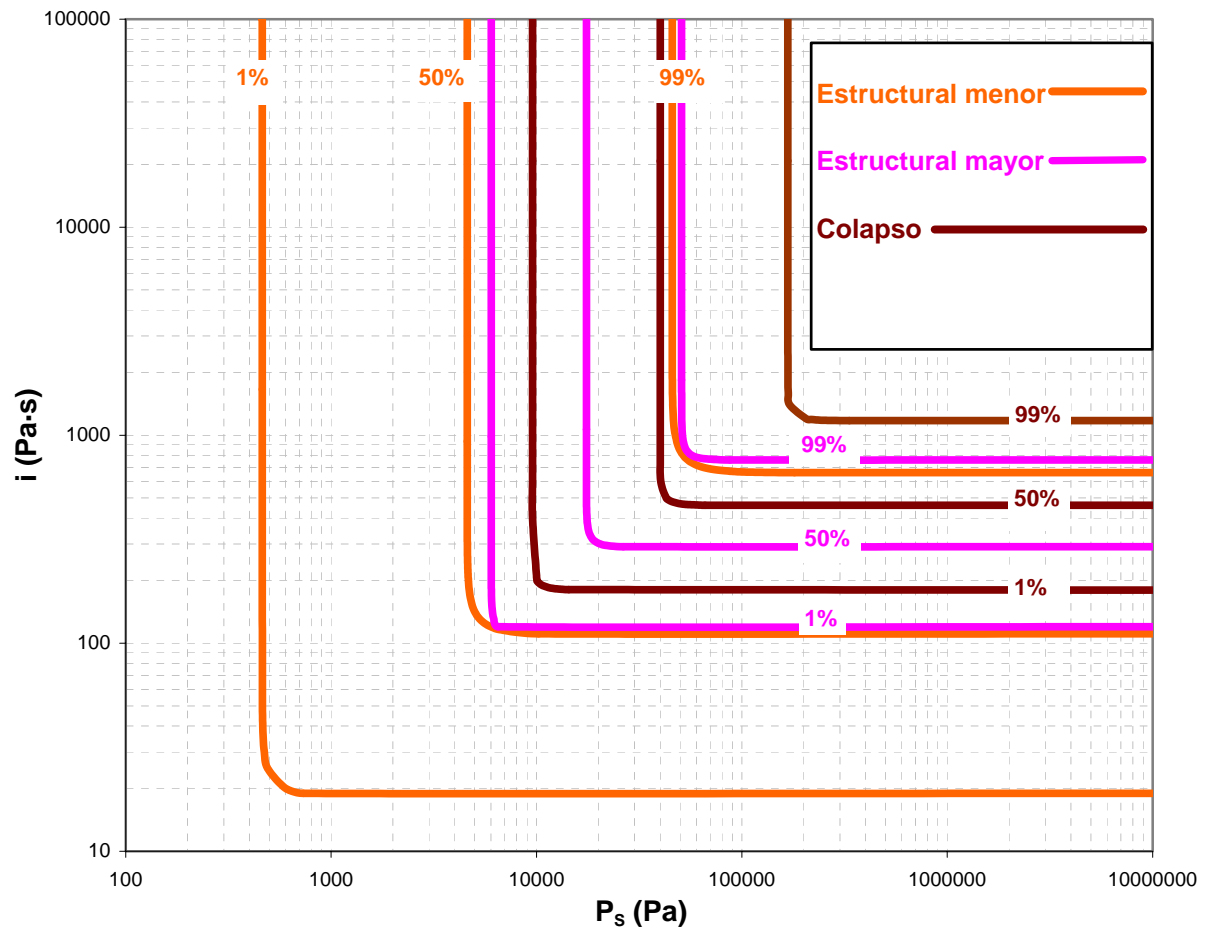


FIGURA 3.8. Líneas de isorriesgo para distintos niveles de daño sobre edificios de cuatro plantas

La forma característica de estas líneas de isorriesgo permite simplificarlas como dos rectas, cuya intersección define los valores característicos de la sobrepresión y del impulso.

3.2.2. Daños producidos por el impacto de fragmentos sobre estructuras

La evaluación de los daños producidos por el impacto de fragmentos contra estructuras o edificaciones es un fenómeno complejo y multivariable que no está suficientemente estudiado, no disponiéndose de modelos que permitan determinar las consecuencias con suficiente aproximación. No obstante, se han abordado algunos aspectos; así, *Lees (1996)* ha propuesto la ecuación 3.22 para estimar la penetración de un fragmento (J , m) en diversos materiales:

$$J = \frac{C M_f}{A_{\text{fragmento}}} \log (1 + 5 \cdot 10^{-5} v_i^2) \quad (3.22)$$

donde M_f (kg) es la masa del fragmento, $A_{\text{fragmento}}$ (m^2) es el área superficial del mismo, v_i (m/s) su velocidad y C (m^3/kg) una constante que depende del material de la superficie afectada -ver tabla 3.5-.

TABLA 3.5. Valores de C de la ecuación 3.22 para varios materiales -*Lees (1996)*-

Material	C (m^3/kg)
Cemento reforzado	$3.5 \cdot 10^{-4}$
Ladrillo	$25 \cdot 10^{-4}$
Acero	$0.5 \cdot 10^{-4}$

Así, un fragmento con velocidad inicial de 60 m/s, 10 Tm y una superficie de 5 m^2 , penetra unos 30 ó 40 cm en superficies de ladrillo, que supera a los espesores típicos de las paredes de los edificios convencionales, lo que puede provocar serios daños en el mismo y, por tanto, afectar a las personas que se encuentren en su interior. Por ejemplo, en la explosión de un reactor en Whiting (Indiana) en 1955, uno de los fragmentos generados impactó contra un edificio a unos 450 m, provocando la muerte de una persona en su interior (*Lees, 1996*). En una explosión en Eagle Pass (Texas) en 1975, un gran fragmento procedente de la explosión de un camión cisterna que transportaba GLP, derrumbó 2 casas prefabricadas a 500 m de distancia del origen de la explosión (*Lees, 1996*). En Tivissa (Tarragona), el impacto de un fragmento de una cisterna provocó daños serios a una vivienda (*Planas-Cuchi y cols., 2004*). Las figuras 3.9 a 3.12 son fotografías que ilustran algunos efectos provocados por fragmentos.



FIGURA 3.9. Fragmento de un recipiente que destruye una vivienda en la explosión de San Juan Ixhuatepec en 1984 (Hawrelak, 1999).



FIGURA 3.10. Daños producidos en una nave (A) por el impacto del fragmento de la figura 3.11 en Albert City (Iowa) en 1998 (CSB, 1999).



FIGURA 3.11. Fragmento de un recipiente que destruye la nave de la figura 3.10 en una granja en Albert City (Iowa) en 1998 (CSB, 1999).



FIGURA 3.12. Fragmento de un tanque de GLP que destruye un almacén en una explosión en Monmouth (Illinois) en 2005 (Anderson, 2005).

3.3. EL IMPULSO MECÁNICO DE LOS FRAGMENTOS

La **Directriz Básica de protección civil para el control y planificación ante el riesgo de accidentes graves en los que intervienen sustancias peligrosas** [en adelante, *Directriz Básica (2003)*], promulgada por el Real Decreto 1196/2003, de 19 de Septiembre, utiliza el impulso mecánico inicial de los fragmentos como magnitud de referencia para establecer los valores límite de las Zonas de Planificación, por lo que interesa considerar algunos aspectos de dicho planteamiento y relacionar la citada magnitud con las posibles distancias de impacto.

El impulso se relaciona con la superficie ($A_{\text{fragmento}}$), la masa (M_f) y la velocidad inicial del fragmento (v_i) en la forma:

$$i = \frac{M_f}{A_{\text{fragmento}}} v_i \quad (3.23)$$

Por otro lado, se verifica:

$$M_f = e_f \rho_f A_{\text{fragmento}} \quad (3.24)$$

donde e_f es el espesor del fragmento y ρ_f su densidad. Combinando las ecuaciones 3.23 y 3.24 se obtiene:

$$i = \rho_f e_f v_i \quad (3.25)$$

También interesa considerar la energía inicial de los fragmentos:

$$E_c = \frac{1}{2} M_f v_i^2 \quad (3.26)$$

que permite determinar la fracción de la energía total que se transfiere como energía mecánica a cada fragmento.

La energía inicial en el momento de la rotura, las características de los fragmentos formados (masa, dimensiones y forma) y los modelos de cálculo pueden ser muy diferentes, por lo que los impulsos y las distancias alcanzadas también lo serán. Por ello, para disponer de información de estas magnitudes se combinan en la tabla 3.6 diversas posibilidades, utilizando los criterios siguientes:

- En la mayoría de los casos, los contenedores son de acero, con una densidad media de 8000 kg/m^3 .
- Se consideran las dos geometrías más habituales, esférica y cilíndrica, y las dimensiones típicas de los recipientes industriales.

- Se utilizan tres modelos de cálculo para determinar las magnitudes de interés de las principales tipologías de estallido (BLEVE, descomposición de sustancias energéticas y gas ideal a presión suponiendo 350 K, masa molecular de 28 g/mol y γ_1 de 1.4-).
- Se consideran todos los posibles fragmentos indicados en las figuras 2.13 y 2.14, seleccionando para los cálculos de impulso y energía cinética el de alcance máximo.
- Los espesores de la pared de los recipientes sometidos a presión suelen estar comprendidos entre 3 y 40 mm -Baquero et al. (1985)-, utilizándose el menor espesor para la energía mínima -a menor presión- y el mayor para la máxima -a mayor presión-.
- Se utilizan niveles de energía mínimos y máximos (10^8 y 10^{10} J, respectivamente) considerados razonables en las explosiones industriales accidentales.

TABLA 3.6. Impulso y energía cinética de los fragmentos formados en varios supuestos accidentales calculados mediante los modelos citados

Causa o fluido implicado y modelo	Geometría y dimensiones	E_{av} (J)	e_f (mm)	v_i (m/s)	M_f (kg)	R_f (m)	i (Pa·s)	E_c (J)
BLEVE (Baum)	Cilindro $d_V = 5$ m $L_V = 20$ m	10^8	3	29	925	65	700	$4 \cdot 10^5$
	Esfera ($d_V = 10$ m)	10^8	3	33	750	60	780	$4 \cdot 10^5$
	Cilindro $d_V = 5$ m $L_V = 20$ m	10^{10}	40	80	12300	590	25500	$5 \cdot 10^5$
	Esfera ($d_V = 10$ m)	10^{10}	40	90	10100	550	28500	$4 \cdot 10^7$
Gas ideal (Baker y Gelfand)	Cilindro $d_V = 5$ m $L_V = 20$ m	10^8	3	27	925	40	660	$3.5 \cdot 10^5$
	Esfera ($d_V = 10$ m)	10^8	3	67	750	95	1600	$1.7 \cdot 10^6$
	Cilindro $d_V = 5$ m $L_V = 20$ m	10^{10}	40	99	12300	530	31700	$6.2 \cdot 10^7$
	Esfera ($d_V = 10$ m)	10^{10}	40	211	10100	1200	67600	$2.2 \cdot 10^8$
Descomp. sustanc. energ. (Moore)	Cilindro $d_V = 5$ m $L_V = 20$ m	10^8	3	112	925	240	2700	$5.4 \cdot 10^7$
	Esfera ($d_V = 10$ m)	10^8	3	126	750	160	3020	$6 \cdot 10^6$
	Cilindro $d_V = 5$ m $L_V = 20$ m	10^{10}	40	308	12300	2750	98600	$5.4 \cdot 10^9$
	Esfera ($d_V = 10$ m)	10^{10}	40	344	10100	1800	110200	$6 \cdot 10^8$

Nota: L_V y d_V son la longitud y el diámetro del recipiente, respectivamente. E_{av} es la energía liberada en la expansión (etapa 2 del apartado I.4.1), v_i la velocidad inicial de los fragmentos, M_f la masa del fragmento que determina el alcance máximo (R_f), i el impulso y E_c la energía cinética.

En la tabla 3.6 se observa que las distancias alcanzadas son muy variadas como resultado del amplio rango de las numerosas variables implicadas. Interesa destacar que los impulsos iniciales obtenidos varían en un amplio rango, de 660 a 110000 Pa·s, que se comentarán en el capítulo 5.

CAPÍTULO 4. CARACTERÍSTICAS SOBREPRESIÓN-IMPULSO-DISTANCIA PARA LAS EXPLOSIONES INDUSTRIALES

En este capítulo se incluye una de las principales contribuciones de esta Tesis Doctoral al estudio de las explosiones industriales, consistente en el desarrollo de una herramienta de análisis de consecuencias basada en el cálculo de relaciones directas entre la sobrepresión, el impulso y la distancia, que permiten una visión general de la relación y la evolución de todas las magnitudes implicadas en las explosiones.

4.1. CARACTERÍSTICAS SOBREPRESIÓN-IMPULSO-DISTANCIA

En cualquier explosión se puede obtener la relación sobrepresión-impulso-distancia de la onda formada, que en esta Tesis se denomina *característica sobrepresión-impulso-distancia*, en adelante *característica*, cuya representación conjunta con las líneas de isorriesgo permite conocer los posibles daños provocados por el accidente.

La figura 4.1 muestra el significado gráfico de la *característica* obtenida a partir de los perfiles sobrepresión-distancia e impulso-distancia de la onda expansiva. Si en dicha *característica* se incluye éste último parámetro, (z_1, z_2, \dots, z_n) se completa la información básica para llevar a cabo el análisis de consecuencias.

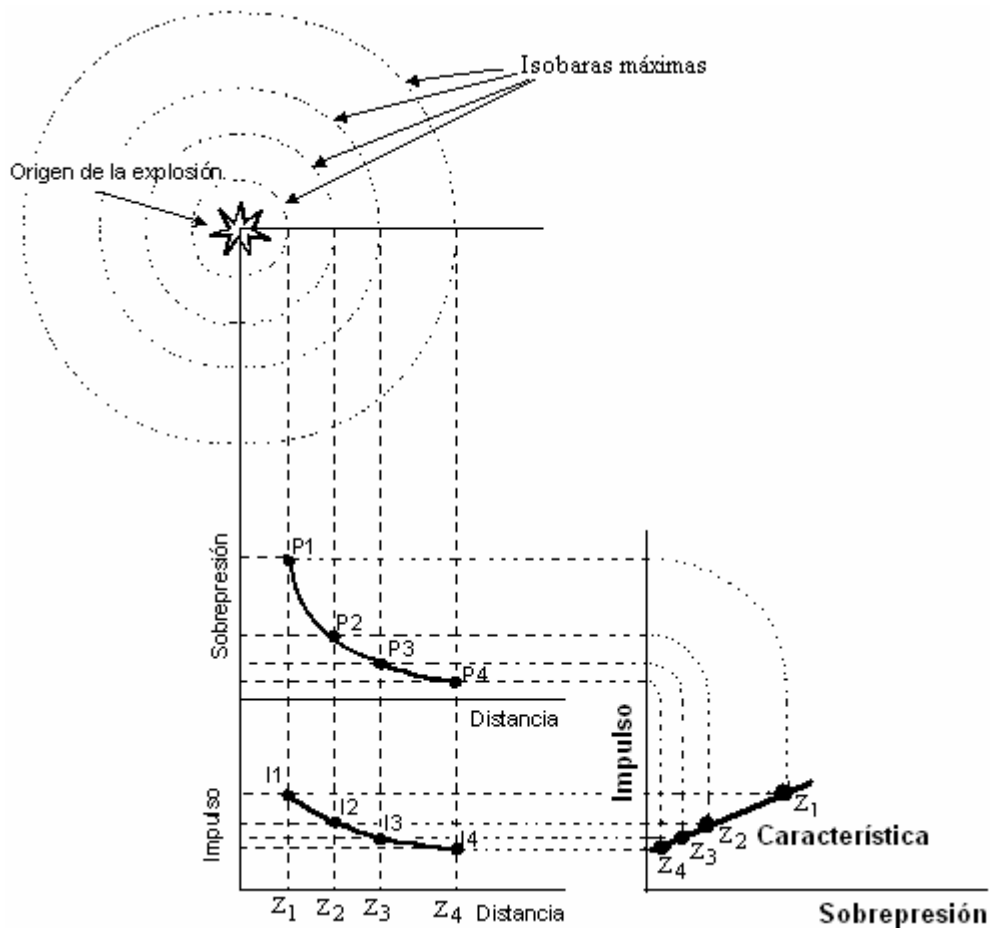


FIGURA 4.1. Significado gráfico de la "característica" de una explosión

Aunque los mecanismos de las explosiones son muy diferentes, las expresiones analíticas de las *características* son análogas, presentando la forma potencial siguiente:

$$i = \alpha_{\text{exp}} P_s^{\beta_{\text{exp}}} \quad (4.1)$$

El factor α_{exp} depende de la energía (o masa) que interviene en la explosión y crece conforme lo hace ésta. Por el contrario, β_{exp} es prácticamente constante en intervalos amplios de sobrepresión e impulso.

El desarrollo de la propuesta incluida en este capítulo se basa en los modelos más utilizados para el cálculo de las magnitudes peligrosas de las explosiones, desarrollados ampliamente en el anexo I, y que son:

- Método del TNT equivalente (detonación de sustancias explosivas, pirotécnicas o inestables).
- Método Multienergía (explosiones de nubes de vapor).
- Método de Baker (estallido de recipientes).

A continuación se indica el procedimiento analítico para obtener las *características* de los tres modelos indicados.

4.1.1. Características obtenidas con el método del TNT equivalente.

El método del TNT equivalente permite calcular los efectos de cualquier sustancia explosiva por comparación de la energía generada con la que liberaría una cantidad equivalente de TNT (W_{TNT} , kg) que produjera los mismos efectos (Lees, 1996), siendo su secuencia de aplicación la siguiente:

- Determinación de la masa de TNT equivalente a la cantidad de sustancia que participa en la explosión (ecuación I.4).
- Cálculo de la “distancia escalada” (z' , m/kg^{1/3}), que depende de la masa de TNT equivalente y de la distancia (z , metros) a la que se desean conocer las magnitudes peligrosas de la onda de presión (ecuación I.5).
- Obtención de la sobrepresión (P_s , Pa) e impulso escalado (i_{TNT} , Pa·s/kg^{1/3}) a partir de las relaciones con la “distancia escalada” indicadas en las figuras I.2 e I.3.
- Transformación del impulso escalado en el impulso mecánico de la onda (i , Pa·s) por medio de la ecuación I.6.

Para obtener las *curvas características* se parte de las figuras I.2 y I.3 (ICChemE, 1994) y se ajustan las relaciones P_s vs z' e i_{TNT} vs z' mediante funciones potenciales, con las siguientes formas:

$$P_s = A_1 z'^{A_2} \quad (4.2)$$

$$i_{TNT} = A_3 z'^{A_4} \quad (4.3)$$

Los valores de A_1 , A_2 , A_3 y A_4 se indican en la tabla 4.1.

TABLA 4.1. Parámetros de las ecuaciones de sobrepresión e impulso escalado para el método del TNT equivalente

Intervalo z'	Ecuación de sobrepresión		Ecuación de impulso escalado	
	A_1	A_2	A_3	A_4
$1 \leq z' < 10$	$1.13 \cdot 10^6$	-2.01	203	-0.91
$10 \leq z' \leq 200$	$1.83 \cdot 10^5$	-1.16	335	-1.06

A partir de las ecuaciones anteriores de sobrepresión e impulso escalado y de la ecuación I.5 se obtiene, para cada intervalo, una *característica* con la siguiente forma general:

$$i = \alpha_{TNT} W_{TNT}^{1/3} P_s^{\beta_{exp}} \quad (4.4)$$

Comparando las ecuaciones 4.1 y 4.4, el factor α_{exp} depende en este caso de la masa equivalente de TNT que participa en la explosión (W_{TNT}), pero no así el exponente β_{exp} , que sólo depende del intervalo de ajuste. En la tabla 4.2 se recogen los valores de α_{TNT} y β_{exp} .

TABLA 4.2. *Características* para el método TNT equivalente

Intervalo R'	α_{TNT}	β_{exp}
$1 \leq z' < 10$	$3.7 \cdot 10^{-1}$	0.45
$10 \leq z' \leq 200$	$5.2 \cdot 10^{-3}$	0.91

La ecuación 4.6 se ha aplicado al accidente de Toulouse en 2001, donde explotó un silo que contenía una masa de nitrato amónico equivalente a unas 150 Tm de TNT, obteniéndose la *característica* indicada en la figura 4.2, donde las distancias se han determinado con las ecuaciones I.5 y 4.2 ó 4.4, dependiendo del intervalo.

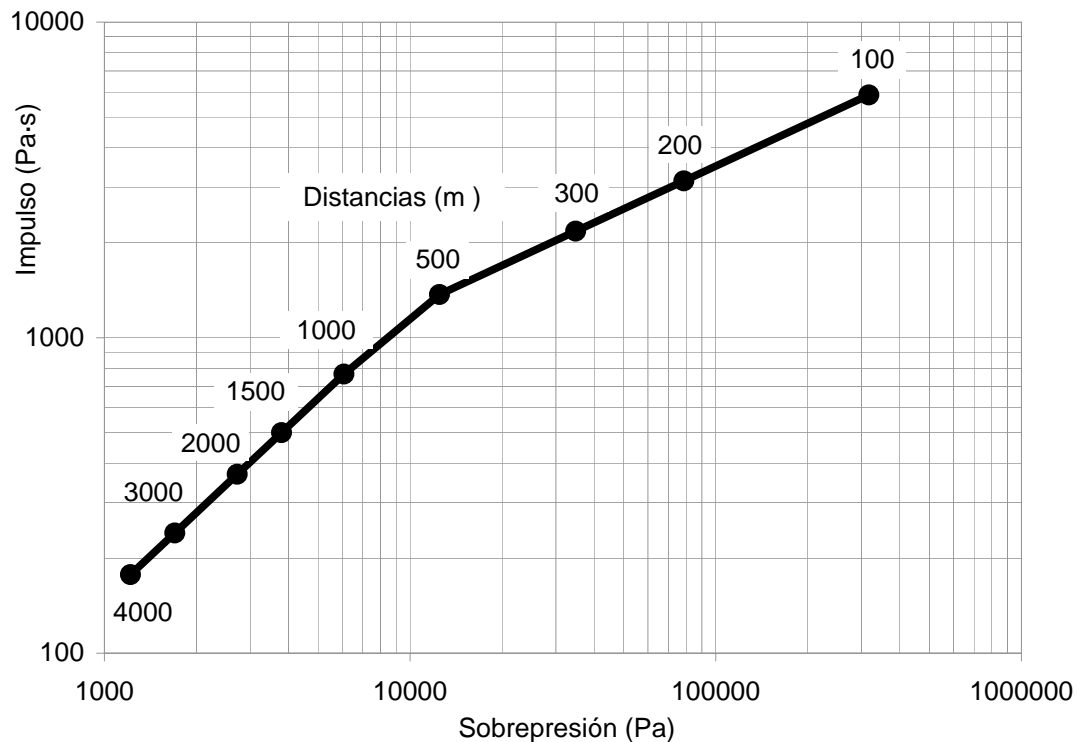


FIGURA 4.2. Característica de la explosión de Toulouse (en 2001) obtenida con el método de TNT equivalente

4.1.2. Características obtenidas con el método de Multienergía.

El método Multienergía (TNO, 1997) se utiliza para la determinación de las magnitudes peligrosas de las ondas de presión procedentes de la explosión de nubes de vapor, teniendo en cuenta que, cuando éstas se inflaman, las mayores sobrepresiones se generan en regiones congestionadas o confinadas de la nube. La secuencia de aplicación del método Multienergía es la siguiente:

- Selección del nivel de la explosión de 1 (deflagración más débil) a 10 (detonación) en función de la reactividad del combustible, ubicación de la nube, cantidad y dimensiones de los obstáculos y energía de la fuente de ignición, entre otros (apartado I.3.1).
- Determinación de la energía de la explosión (E_{exp} , J) a partir de la cantidad de sustancia combustible en la nube que se encuentra entre los límites de explosividad y de su entalpía de combustión (ecuaciones I.27 e I.28).

- Cálculo de la “distancia escalada” (R' , adimensional), que depende de la energía de la explosión y de la distancia (z , metros) a la que se desean conocer las magnitudes peligrosas de la onda de presión (ecuación I.3).
- Obtención de la sobrepresión escalada (P' , adimensional) e impulso escalado (i' , adimensional) a partir de las relaciones con la “distancia escalada” indicadas en las figuras I.5 y 5.6, respectivamente.
- Transformación de la sobrepresión escalada y del impulso escalado en la sobrepresión (P_s , Pa) e impulso mecánico de la onda (i , Pa·s) por medio de las ecuaciones I.2 y 5.23, respectivamente.

Como se indica anteriormente, el método Multienergía distingue diez niveles de explosión para las nubes. Para obtener las *características*, se determinan para cada uno de ellos los intervalos de sobrepresión e impulso para los que se ajustan las relaciones $P'-R'$ e $i'-R'$. La combinación de estas ecuaciones, expresadas en función de P_s e i , permite obtener las mencionadas *características*, siguiendo el procedimiento del apartado anterior.

Las ecuaciones que relacionan la sobrepresión escalada con la distancia escalada tienen la siguiente forma general:

$$P' = C_1 R'^{C_2} \quad (4.5)$$

donde C_1 y C_2 son parámetros de ajuste.

Los resultados obtenidos para cada intervalo y nivel de explosión se indican en la tabla 4.3.

TABLA 4.3. Parámetros de ajuste de las ecuaciones de sobrepresión escalada para el método de Multienergía

Nivel de la explosión	Intervalo R'	C ₁	C ₂	Intervalo R'	C ₁	C ₂
1	$0.23 \leq R' < 0.6$	10^{-2}	0	$0.6 \leq R' \leq 7$	$6.40 \cdot 10^{-3}$	-0.97
2	$0.23 \leq R' < 0.7$	$2 \cdot 10^{-2}$	0	$0.7 \leq R' \leq 12$	$1.32 \cdot 10^{-2}$	-0.98
3	$0.23 \leq R' < 0.6$	$5 \cdot 10^{-2}$	0	$0.6 \leq R' \leq 30$	$6.05 \cdot 10^{-2}$	-0.99
4	$0.23 \leq R' < 0.5$	10^{-1}	0	$0.5 \leq R' \leq 70$	$6.44 \cdot 10^{-2}$	-0.99
5	$0.23 \leq R' < 0.6$	$2 \cdot 10^{-1}$	0	$0.6 \leq R' \leq 90$	$1.17 \cdot 10^{-1}$	-0.99
6	$0.23 \leq R' < 0.6$	$5 \cdot 10^{-1}$	0	$0.6 \leq R' \leq 100$	$3.01 \cdot 10^{-1}$	-1.11
7	$0.23 \leq R' < 0.5$	1	0	$0.5 \leq R' \leq 100$	$4.06 \cdot 10^{-1}$	-1.20
8	$0.23 \leq R' < 0.5$	2	0	$0.5 \leq R' < 1$	$4.76 \cdot 10^{-1}$	-2.08
	$1 \leq R' < 2$	$4.67 \cdot 10^{-1}$	-1.58	$2 \leq R' \leq 100$	$3.18 \cdot 10^{-1}$	-1.13
9	$0.23 \leq R' < 0.35$	5	0	$0.35 \leq R' < 1$	$4.87 \cdot 10^{-1}$	-2.03
	$1 \leq R' < 2$	$4.67 \cdot 10^{-1}$	-1.58	$2 \leq R' \leq 100$	$3.18 \cdot 10^{-1}$	-1.13
10	$0.23 \leq R' < 1$	$4.41 \cdot 10^{-1}$	-2.39	$1 \leq R' < 2$	$4.67 \cdot 10^{-1}$	-1.58
	$2 \leq R' \leq 100$	$3.18 \cdot 10^{-1}$	-1.13			

De manera similar, se ajustan las ecuaciones de impulso escalado, con la siguiente forma general:

$$i' = C_3 R'^{C_4} \quad (4.6)$$

donde C_3 y C_4 son parámetros de ajuste.

Los resultados obtenidos para cada intervalo y nivel de explosión se indican en la tabla 4.4.

TABLA 4.4. Parámetros de ajuste de las ecuaciones de impulso escalado para el método de Multienergía

Nivel de la explosión	Intervalo R'	C ₃	C ₄	Intervalo R'	C ₃	C ₄
1	0.23 ≤ R' < 0.6	4.41 10 ⁻²	-0.20	0.6 ≤ R' ≤ 7	2.96 10 ⁻²	-0.94
2	0.23 ≤ R' < 0.7	5.22 10 ⁻²	-0.27	0.7 ≤ R' ≤ 12	4.03 10 ⁻²	-1.05
3	0.23 ≤ R' < 0.6	8.74 10 ⁻²	-0.20	0.6 ≤ R' ≤ 30	6.05 10 ⁻²	-0.99
4	0.23 ≤ R' < 0.5	1.4 10 ⁻¹	0	0.5 ≤ R' ≤ 70	6.77 10 ⁻²	-0.97
5	0.23 ≤ R' < 0.6	1.25 10 ⁻¹	-0.26	0.6 ≤ R' ≤ 90	8.46 10 ⁻²	-1.00
6	0.23 ≤ R' < 0.8	1.28 10 ⁻¹	-0.45	0.8 ≤ R' ≤ 100	1.14 10 ⁻¹	-1.03
7	0.23 ≤ R' < 0.6	1.98 10 ⁻¹	-0.49	0.6 ≤ R' ≤ 100	1.14 10 ⁻¹	-1.03
8	0.23 ≤ R' < 0.6	1.66 10 ⁻¹	-0.90	0.6 ≤ R' ≤ 100	1.14 10 ⁻¹	-1.03
9	0.23 ≤ R' < 0.3	1.11	0.89	0.3 ≤ R' < 0.4	3.08 10 ⁻¹	-1.08
	0.4 ≤ R' < 0.8	8.08 10 ⁻²	-2.26	0.8 ≤ R' ≤ 100	1.14 10 ⁻¹	-1.03
10	0.23 ≤ R' < 0.3	10.82	1.14	0.3 ≤ R' < 0.4	3.15 10 ⁻¹	-1.79
	0.4 ≤ R' < 0.5	1.30 10 ⁻³	-7.52	0.5 ≤ R' ≤ 100	1.14 10 ⁻¹	-1.03

Combinando las ecuaciones 4.5 y 4.6 con los parámetros correspondientes al nivel e intervalo adecuados con las ecuaciones I.3 y 5.23 se obtienen las *características* cuya forma general depende del intervalo. Así:

Para el primer intervalo de cada nivel de explosión (excepto el 10):

$$P_s = K \quad (4.7)$$

Para el resto de intervalos:

$$i = \alpha_{Mult} E_{exp}^{1/3} P_s^{\beta_{exp}} \quad (4.8)$$

En la tabla 4.5 se incluyen los valores de K y en la tabla 4.6 los de α_{Mult} y β_{exp} correspondientes a los distintos intervalos y niveles de explosión.

TABLA 4.5. Valores de K para la ecuación 4.7

Nivel de la explosión	Intervalo R'	K (Pa)
1	$0.23 \leq R' < 0.6$	1013
2	$0.23 \leq R' < 0.7$	2030
3	$0.23 \leq R' < 0.6$	5070
4	$0.23 \leq R' < 0.5$	10130
5	$0.23 \leq R' < 0.6$	20260
6	$0.23 \leq R' < 0.6$	50650
7	$0.23 \leq R' < 0.5$	101300
8	$0.23 \leq R' < 0.5$	202600
9	$0.23 \leq R' < 0.35$	506500

TABLA 4.6. Valores de α_{Mult} y de β_{exp} para la ecuación 4.8.

Nivel de la explosión	Intervalo R'	α_{Mult}	β_{exp}			
1	$0.6 \leq R' \leq 7$	$1.76 \cdot 10^{-4}$	0.97			
2	$0.7 \leq R' \leq 12$	$5.76 \cdot 10^{-5}$	1.07			
3	$0.6 \leq R' \leq 30$	$5.24 \cdot 10^{-5}$	1.02			
4	$0.5 \leq R' \leq 70$	$3.96 \cdot 10^{-5}$	0.98			
5	$0.6 \leq R' \leq 90$	$2.07 \cdot 10^{-5}$	1.01	Intervalo R'	α_{Mult}	β_{exp}
6	$0.6 \leq R' < 0.8$	$1.14 \cdot 10^{-1}$	-1.03	$0.8 \leq R' \leq 100$	$2.51 \cdot 10^{-5}$	0.93
7	$0.5 \leq R' < 0.6$	$8.24 \cdot 10^{-3}$	0.41	$0.6 \leq R' \leq 100$	$3.99 \cdot 10^{-5}$	0.86
8	$0.5 \leq R' < 0.6$	$4.60 \cdot 10^{-3}$	0.43	$0.6 \leq R' < 1$	$1.59 \cdot 10^{-3}$	0.50
	$1 \leq R' < 2$	$3.26 \cdot 10^{-4}$	0.65	$2 \leq R' \leq 100$	$2.83 \cdot 10^{-5}$	0.91
9	$0.35 \leq R' < 0.4$	$3.13 \cdot 10^{-3}$	0.53	$0.4 \leq R' < 0.8$	$1.54 \cdot 10^{-6}$	1.11
	$0.8 \leq R' < 1$	$1.51 \cdot 10^{-3}$	0.51	$1 \leq R' < 2$	$3.26 \cdot 10^{-4}$	0.65
	$2 \leq R' \leq 100$	$2.83 \cdot 10^{-5}$	0.91	-	-	-
10	$0.23 \leq R' < 0.3$	$5.71 \cdot 10^3$	-0.48	$0.3 \leq R' < 0.4$	$3.31 \cdot 10^{-4}$	0.75
	$0.4 \leq R' < 0.5$	$9.70 \cdot 10^{-18}$	3.15	$0.5 \leq R' < 1$	$3.61 \cdot 10^{-3}$	0.43
	$1 \leq R' < 2$	$3.26 \cdot 10^{-4}$	0.65	$2 \leq R' < 100$	$2.83 \cdot 10^{-5}$	0.91

Como aplicación, se representa en la figura 4.3 la *característica* del accidente de Flixborough en 1974, donde explotó una nube de 30 Tm de ciclohexano (equivalente a $1.42 \cdot 10^{12}$ J), considerando el máximo nivel de explosión (10), según *Hoiset et al. (2000)*.

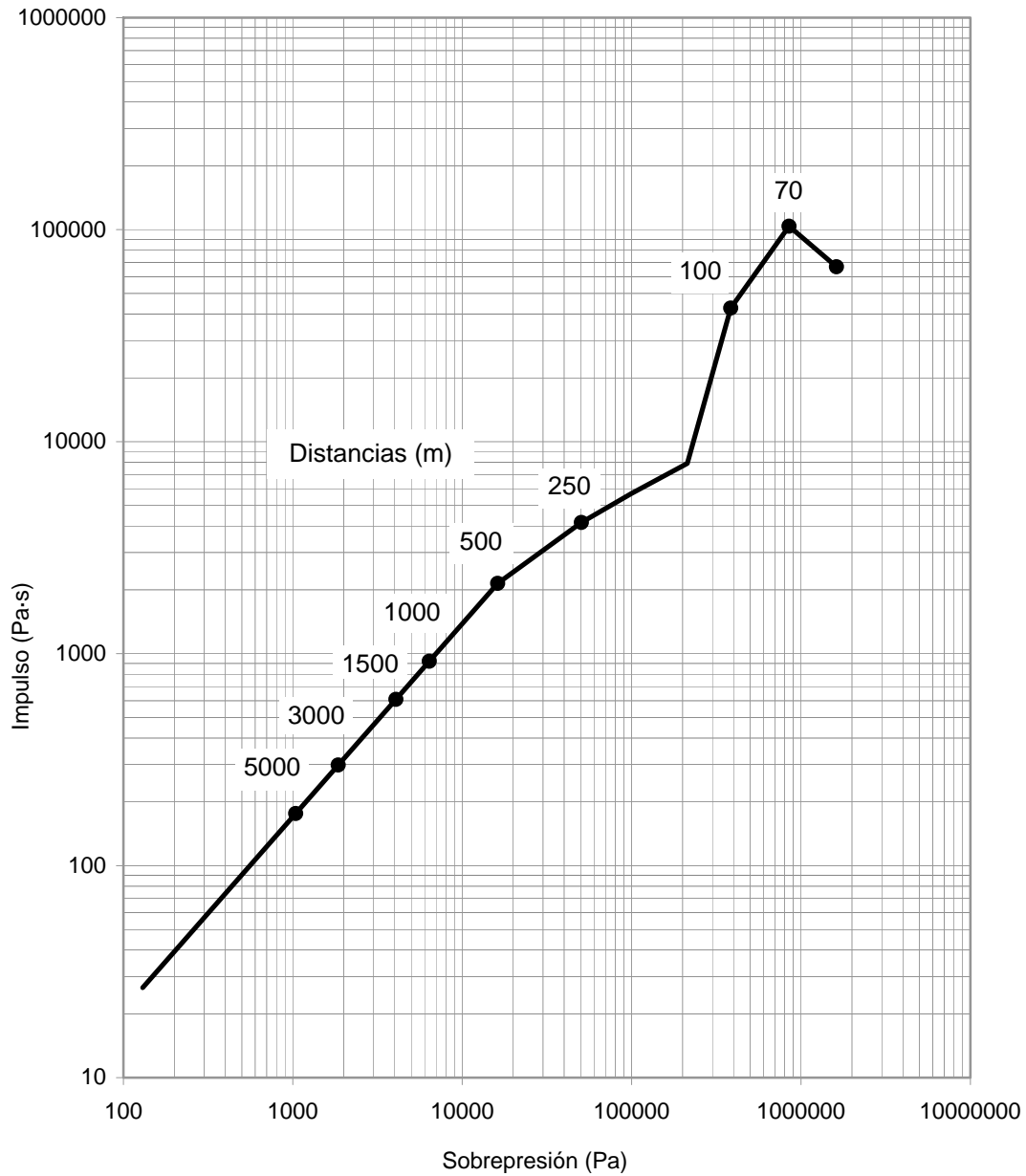


FIGURA 4.3. Característica de la explosión de Flixborough (en 1974), obtenida con el método de Multienergía

4.1.3. Características obtenidas con el método de Baker

El método de Baker (*Baker et al., 1977*) se utiliza para el cálculo de la sobrepresión e impulso generado en el estallido de recipientes, siendo su secuencia de aplicación la siguiente:

- Determinación de la energía liberada en la expansión (E_{av} , J), siguiendo para ello alternativas que dependen del estado físico del fluido (gas, vapor, líquido-vapor), de las condiciones de almacenamiento y de la causa del estallido (etapa 2 del apartado I.4.1) y, a partir de ésta, la energía de la explosión (E_{exp} , J) - etapa 3 del apartado I.4.1-.
- Cálculo de la “distancia escalada” (R' , adimensional), que depende de la energía de la explosión y de la distancia (z , metros) a la que se desean conocer las magnitudes peligrosas de la onda de presión (ecuación I.3).
- Obtención de la sobrepresión escalada (P' , adimensional) e impulso escalado (i' , adimensional) a partir de las relaciones con la “distancia escalada” indicadas en las figuras I.13 y I.18, respectivamente.
- Corrección de P' e i' en función de la geometría del recipiente y de su ubicación (elevado o cerca del suelo), utilizando las tablas I.10 y I.11.
- Transformación de la sobrepresión escalada y del impulso escalado corregidos en la sobrepresión (P_s , Pa) e impulso mecánico de la onda (i , Pa·s) por medio de las ecuaciones I.31 y I.45, respectivamente.

Para obtener las características, se parte de las figuras I.13 y I.18 y se ajustan las relaciones P' vs R' e i' vs R' mediante funciones potenciales, con la forma general de las ecuaciones 4.5 y 4.6, respectivamente. Aplicando los coeficientes de ajuste correspondientes (tablas I.10 y I.11, suponiendo que los recipientes se encuentran cerca del suelo) se obtienen dos expresiones, dependiendo de la geometría del contenedor -esférico o cilíndrico-. Para obtener ajustes adecuados se divide cada curva en tres intervalos, indicados en las tablas 4.7 y 4.8.

4.1.3.1. Recipientes esféricos

TABLA 4.7. Parámetros de ajuste de las ecuaciones de sobrepresión e impulso escalados para recipientes esféricos

Intervalo R'	Parámetros para la ecuación de la sobrepresión escalada		Parámetros para la ecuación del impulso escalado	
	C_1	C_2	C_3	C_4
$0.1 \leq R' \leq 0.2$	1.25	-1.92	$1.64 \cdot 10^{-2}$	-1.97
$0.2 < R' \leq 1.5$	0.58	-2.39	$6.22 \cdot 10^{-2}$	-1.14
$1.5 < R' \leq 1000$	0.26	-1.11	$5.50 \cdot 10^{-2}$	-1.04

A partir de las funciones ajustadas $P'-R'$ e $i'-R'$, utilizando los valores de P_s (ecuación I.2), de la distancia z (ecuación I.3) y del impulso i (ecuación I.44), se obtienen las *características* para cada intervalo, con la siguiente forma general:

$$i = \alpha_{Bak} E_{exp}^{1/3} P_s^{\beta_{exp}} \quad (4.9)$$

TABLA 4.8. Parámetros de ajuste de las *características* para recipientes esféricos

Intervalo R'	α_{Bak}	β_{exp}
$0.1 \leq R' \leq 0.2$	$6.09 \cdot 10^{-7}$	1.03
$0.2 < R' \leq 1.5$	$2.11 \cdot 10^{-3}$	0.48
$1.5 < R' \leq 1000$	$2.53 \cdot 10^{-5}$	0.94

4.1.3.2. Recipientes cilíndricos

TABLA 4.9. Parámetros de ajuste de las ecuaciones de sobrepresión e impulso escalados para recipientes cilíndricos

Intervalo R'	Parámetros para la ecuación de la sobrepresión escalada		Parámetros para la ecuación del impulso escalado	
	C_1	C_2	C_3	C_4
$0.1 \leq R' \leq 0.2$	4.99	-1.92	$3.28 \cdot 10^{-2}$	-1.97
$0.2 < R' \leq 1.5$	0.86	-2.80	$6.34 \cdot 10^{-2}$	-1.39
$1.5 < R' \leq 1000$	0.40	-1.13	$5.58 \cdot 10^{-2}$	-1.04

De forma análoga a la del apartado anterior se obtienen *características* que se ajustan a la forma general de la ecuación 4.9. En la tabla 4.10 se recogen los parámetros α_{Bak} y β_{exp} para recipientes cilíndricos.

TABLA 4.10. Parámetros de ajuste de las *características* para recipientes cilíndricos

Intervalo R'	α_{Bak}	β_{exp}
$0.1 \leq R' \leq 0.2$	$2.94 \cdot 10^{-7}$	1.03
$0.2 < R' \leq 1.5$	$1.43 \cdot 10^{-3}$	0.50
$1.5 < R' \leq 1000$	$2.05 \cdot 10^{-5}$	0.92

Una vez obtenidas las *características* de los estallidos de recipientes esféricos y cilíndricos, se representa en la figura 4.4 la correspondiente al accidente de Beijing (China) en 1997, donde explotó una esfera que contenía unas 300 Tm de etileno.

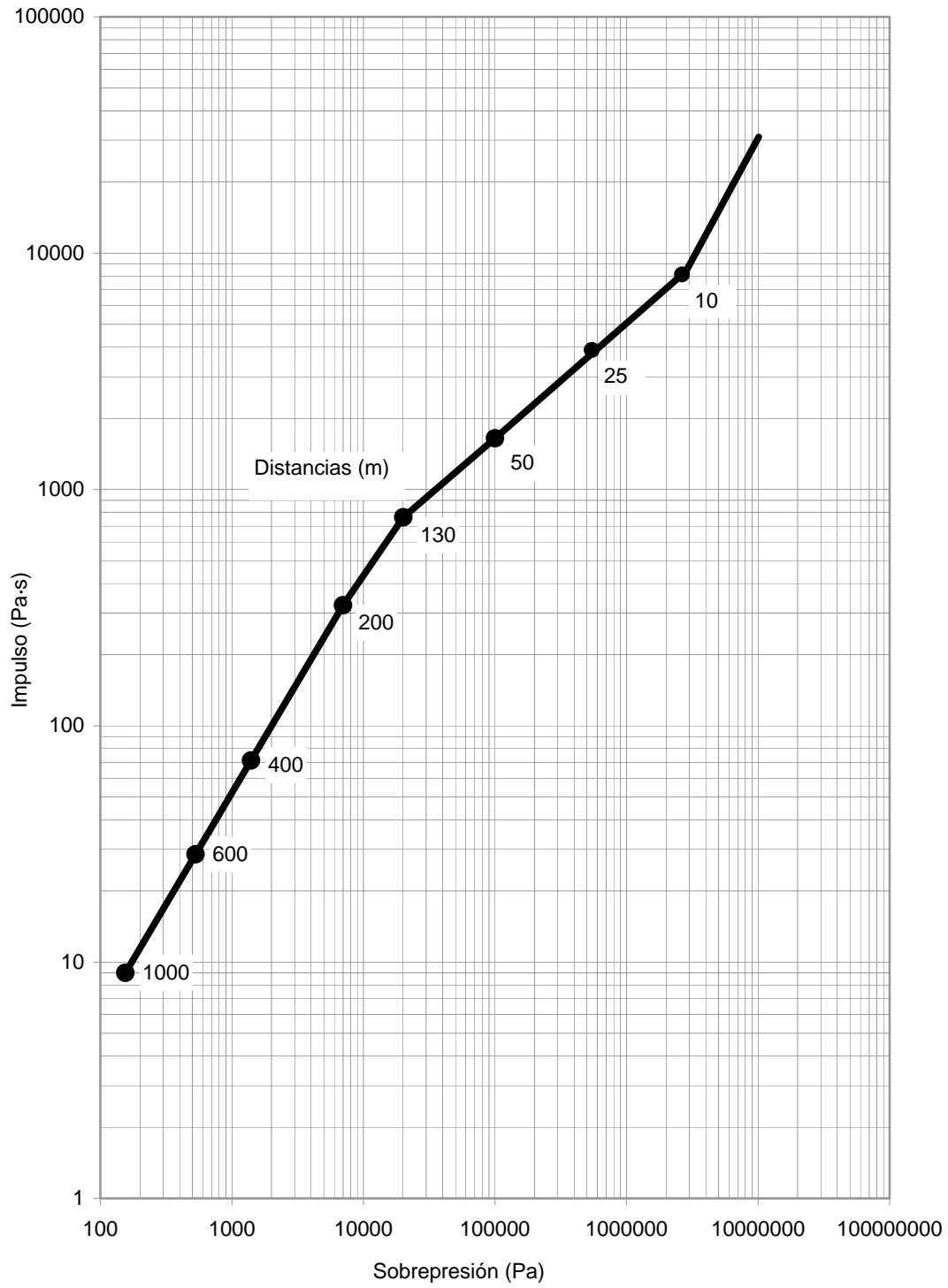


FIGURA 4.4. Característica de la explosión de Beijing (en 1997), obtenida con el método de Baker.

4.2. DOMINIO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS EXPLOSIONES

Los resultados de los apartados anteriores demuestran que hay una relación biunívoca de la sobrepresión (P_s) e impulso (i) de la onda generada en cualquier explosión. También se observa que conforme aumenta la masa o energía implicadas en las explosiones, el impulso crece para un determinado valor de P_s pero desde un punto de vista práctico es razonable plantear que dicho crecimiento tiene límites, definidos por las explosiones de mayor nivel que pueden estimarse posibles, como consecuencia de eventos accidentales en la industria. En este sentido, los accidentes analizados en los apartados anteriores (Toulouse, Flixborough y Beijing) han sido considerados como los de mayor importancia respecto a las masas y/o energías puestas en juego. No obstante, para establecer un “dominio máximo aceptable” de las *características* de las explosiones industriales, se proponen tres casos hipotéticos donde las masas y/o energías implicadas triplican aproximadamente a las estimadas en los accidentes de Toulouse (2001), Flixborough (1974) y Beijing (1997), por lo que se establece que la característica de cualquier explosión industrial accidental estará situada por debajo de estas *características* “máximas”. Junto a ellas se representan las correspondientes a cantidades más pequeñas de TNT o energías de la explosión (figuras 4.5 a 4.17), incluyendo también las líneas de *iso-distancias*, es decir, las que unen los puntos sobre diferentes *características* que corresponden a las mismas distancias. Estos diagramas permiten conocer directamente las magnitudes peligrosas (sobrepresión e impulso) de cualquier explosión a cualquier distancia siendo, por tanto, un instrumento válido para el análisis de consecuencias de estos accidentes y permitiendo una visión general de la relación y la evolución de todas las magnitudes implicadas en las explosiones.

Para obtener las ecuaciones de las mencionadas líneas de *iso-distancia* para cada intervalo, se debe tomar la ecuación ajustada de sobrepresión (para el método de TNT equivalente) o la de sobrepresión escalada (para Multienergía y Baker) y, utilizando la ecuación I.5 (para TNT equivalente) ó I.2 e I.3 (para Multienergía y Baker), se tiene:

- Para el TNT equivalente:

$$P_s = A_1 \left(\frac{z}{W_{TNT}^{1/3}} \right)^{A_2} \quad (4.10)$$

- Para Multienergía y Baker:

$$P_s = C_1 P_0 \left[\left(\frac{z}{(E_{\text{exp}} / P_0)^{1/3}} \right) \right]^{C_2} \quad (4.11)$$

Despejando $W_{TNT}^{1/3}$ de la ecuación 4.10 ó $E_{exp}^{1/3}$ de la ecuación 4.11 y sustituyendo en la *característica* correspondiente, se tiene:

- Para el TNT equivalente:

$$i = \alpha_{TNT} A_1^{(1/A_2)} z P_s^{(\beta_{exp} - 1/A_2)} \quad (4.12)$$

- Para Multienergía y Baker:

$$i = \alpha_{Mult \text{ ó } Bak} P_0^{1/3} [C_1 P_0]^{(1/C_2)} z P_s^{(\beta_{exp} - 1/C_2)} \quad (4.13)$$

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

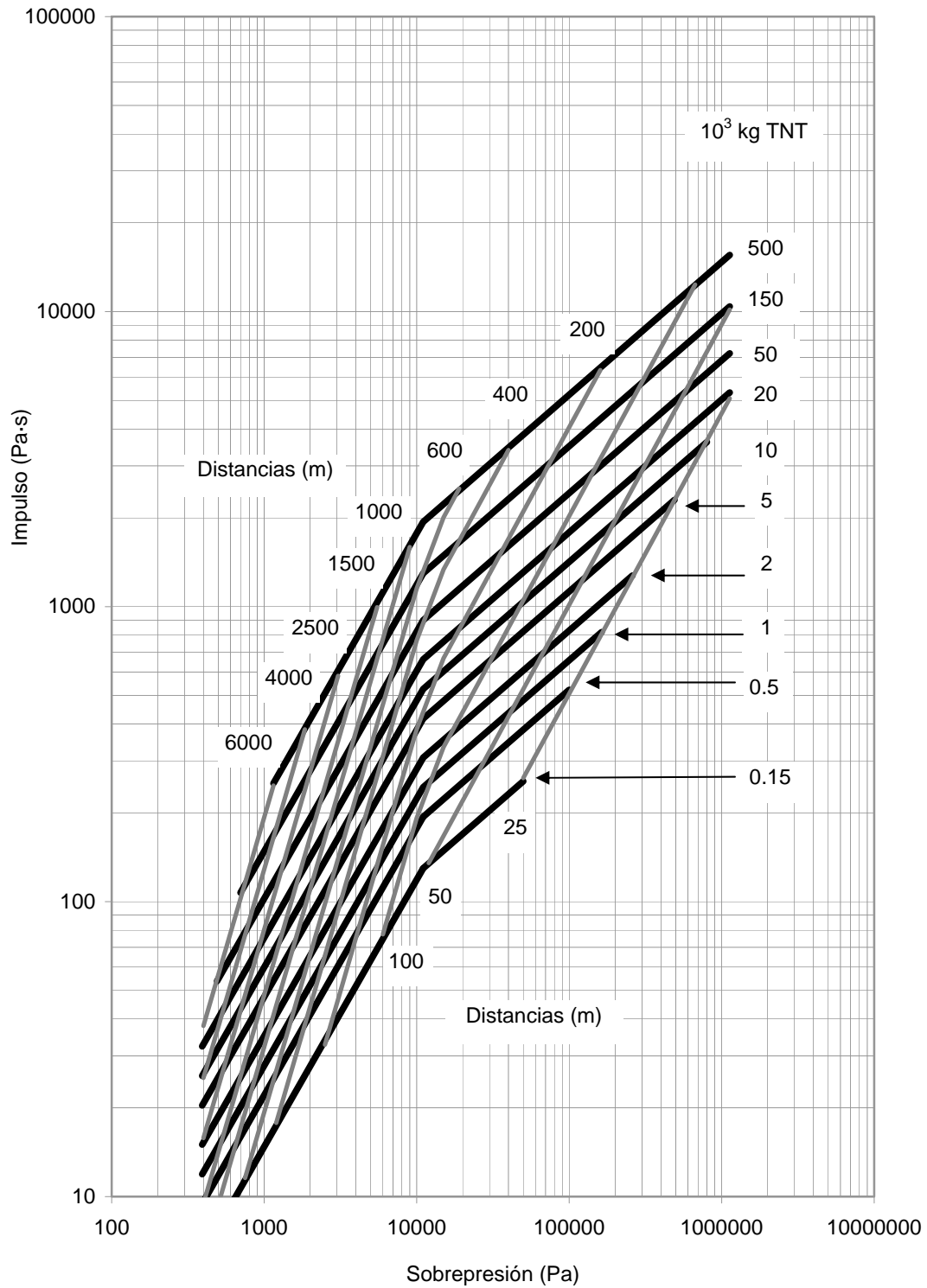


FIGURA 4.5. “Características” de la detonación de diferentes masas de explosivos utilizando el modelo del TNT equivalente

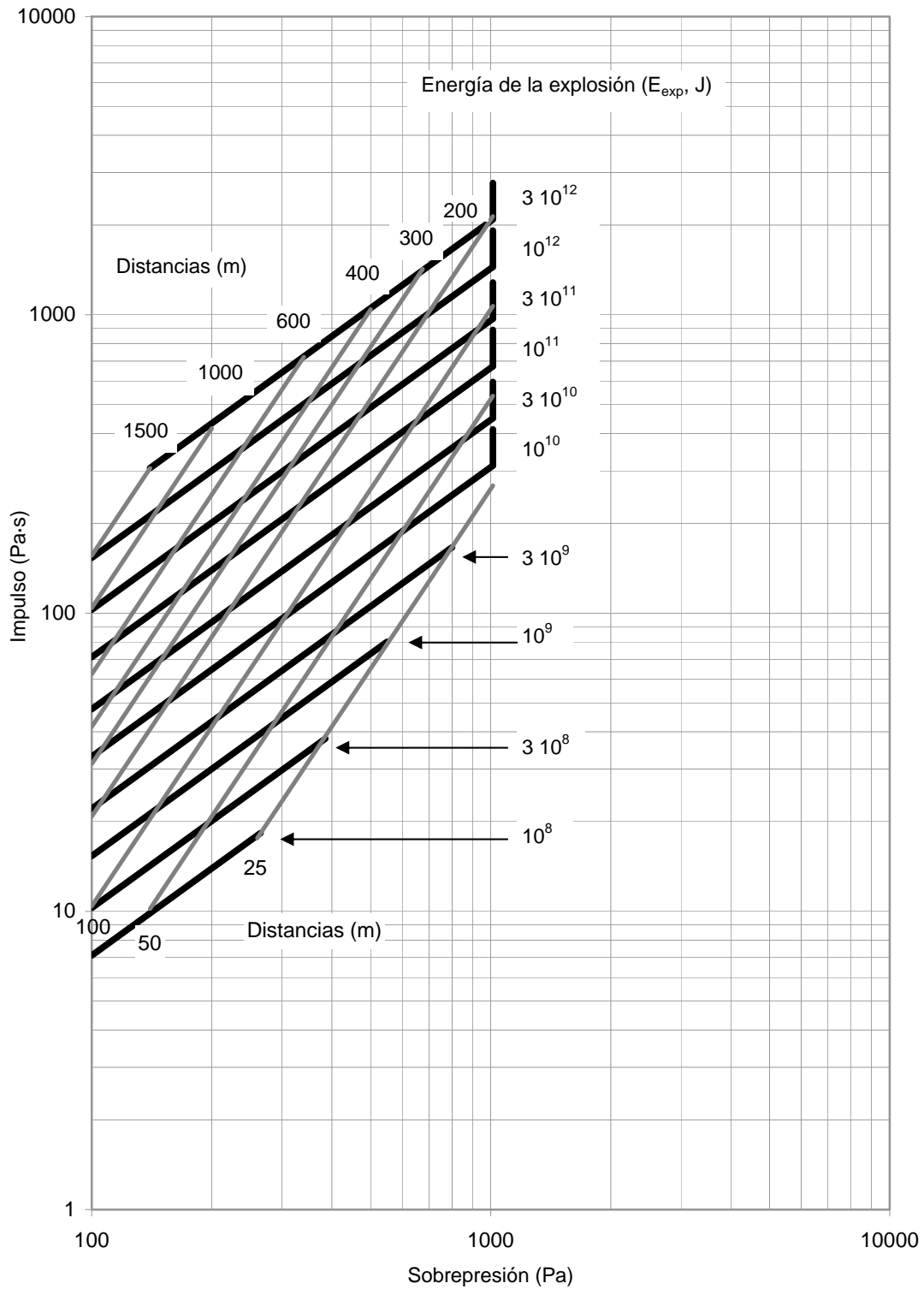


FIGURA 4.6. “Características” de la explosión de nubes con diferentes energías para el nivel de explosión 1, utilizando el modelo de Multienergía

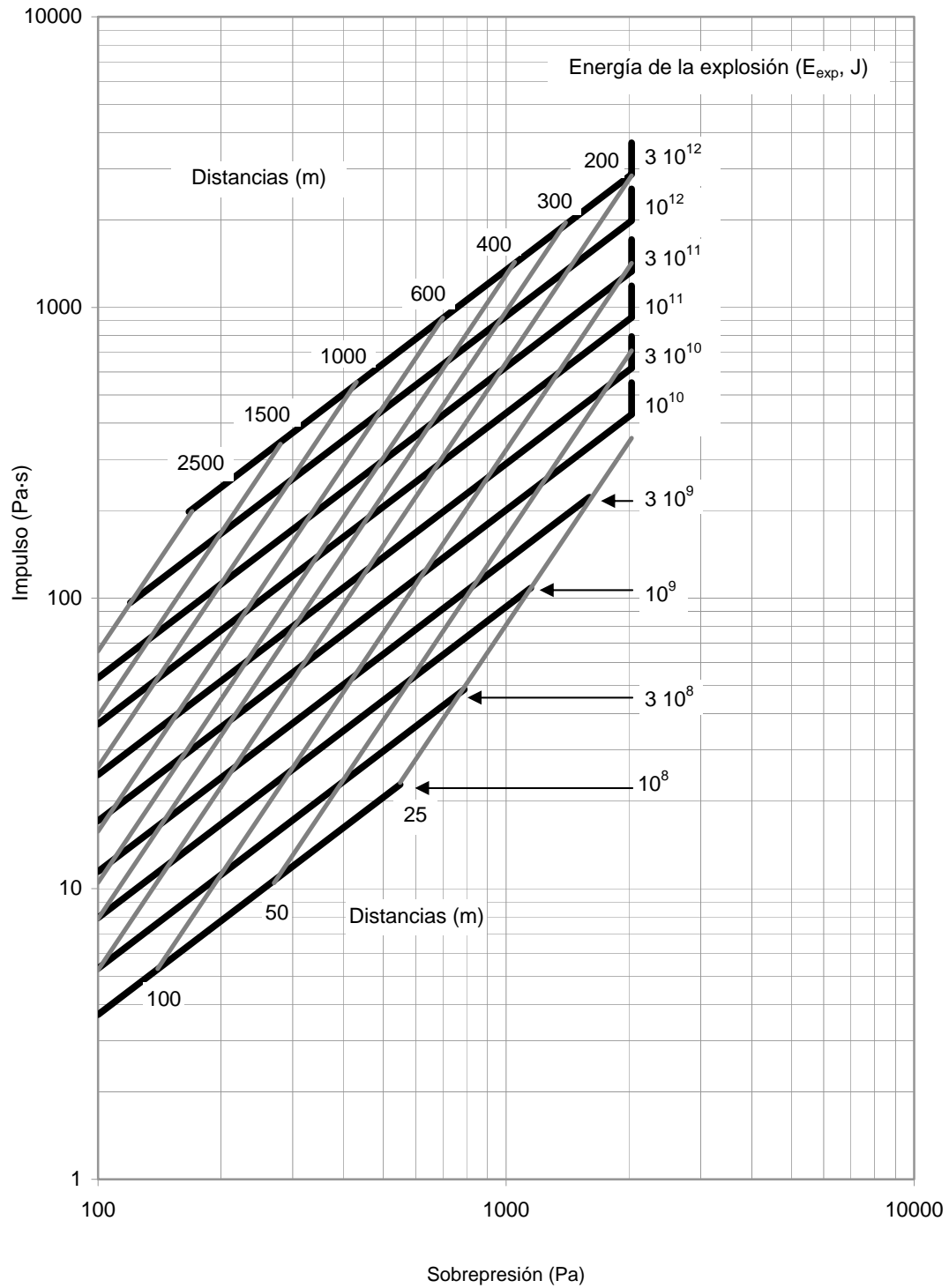


FIGURA 4.7. “Características” de la explosión de nubes con diferentes energías para el nivel de explosión 2, utilizando el modelo de Multienergía

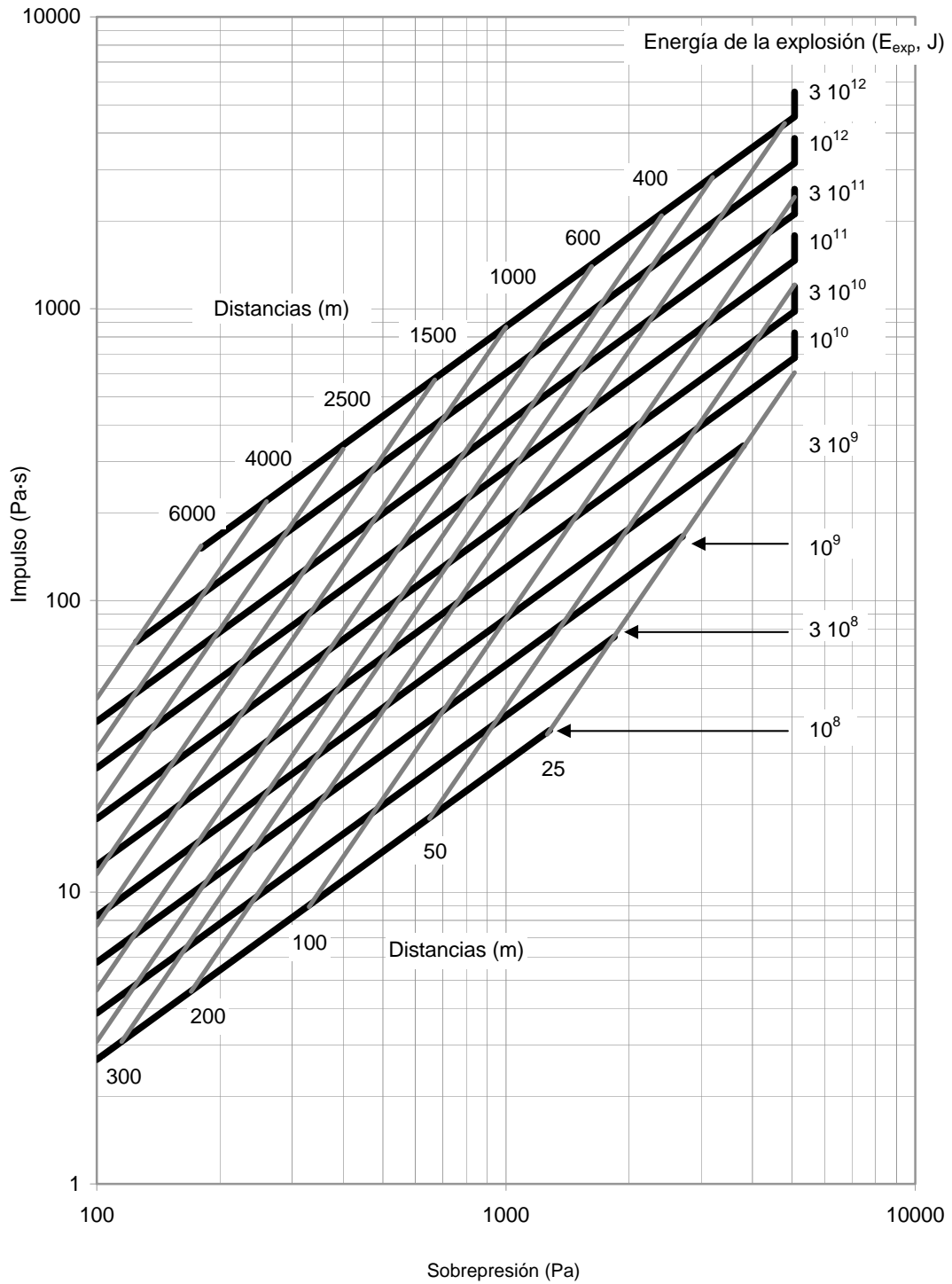


FIGURA 4.8. “Características” de la explosión de nubes con diferentes energías para el nivel de explosión 3, utilizando el modelo de Multienergía

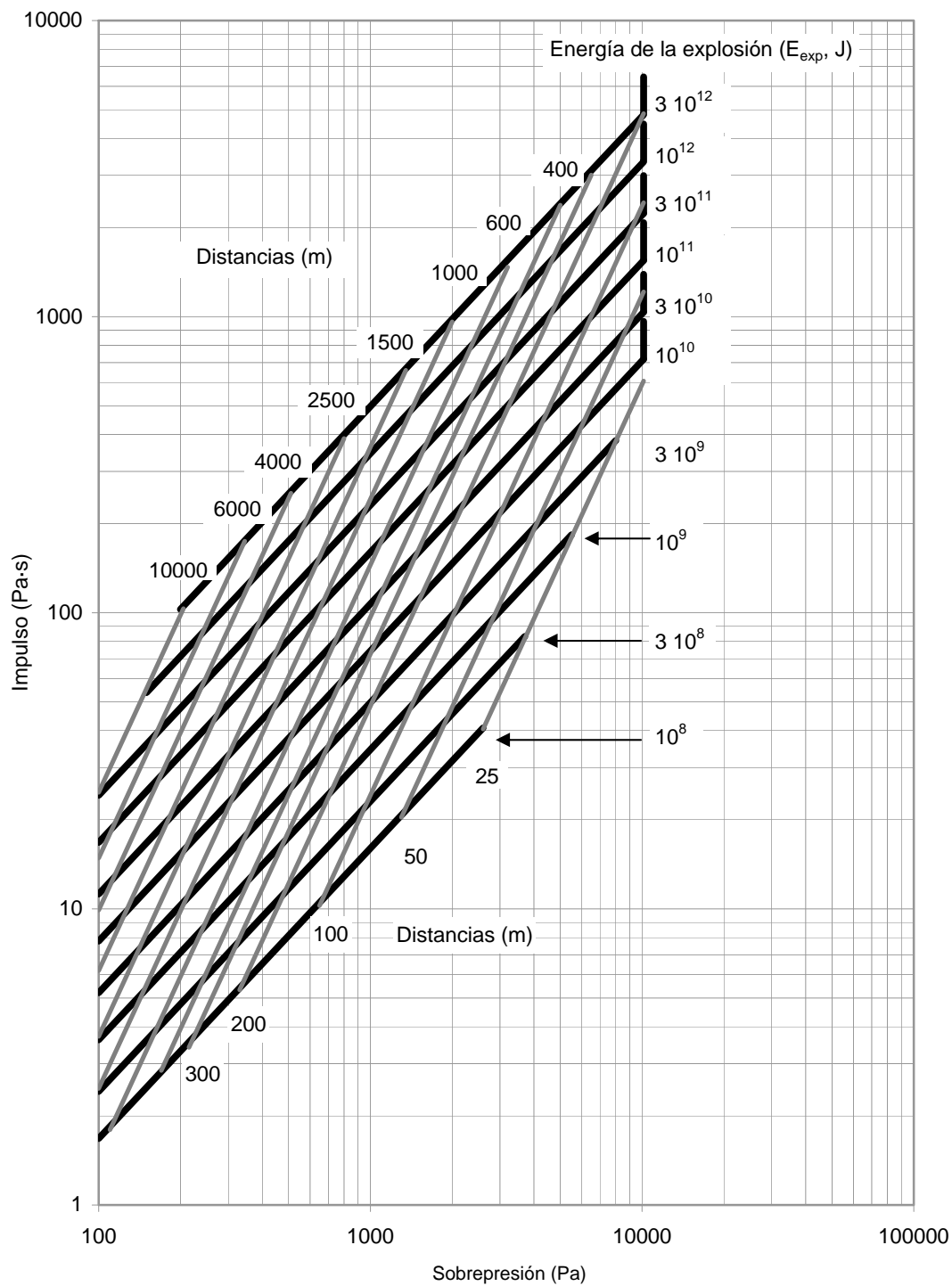


FIGURA 4.9. “Características” de la explosión de nubes con diferentes energías para el nivel de explosión 4, utilizando el modelo de Multienergía

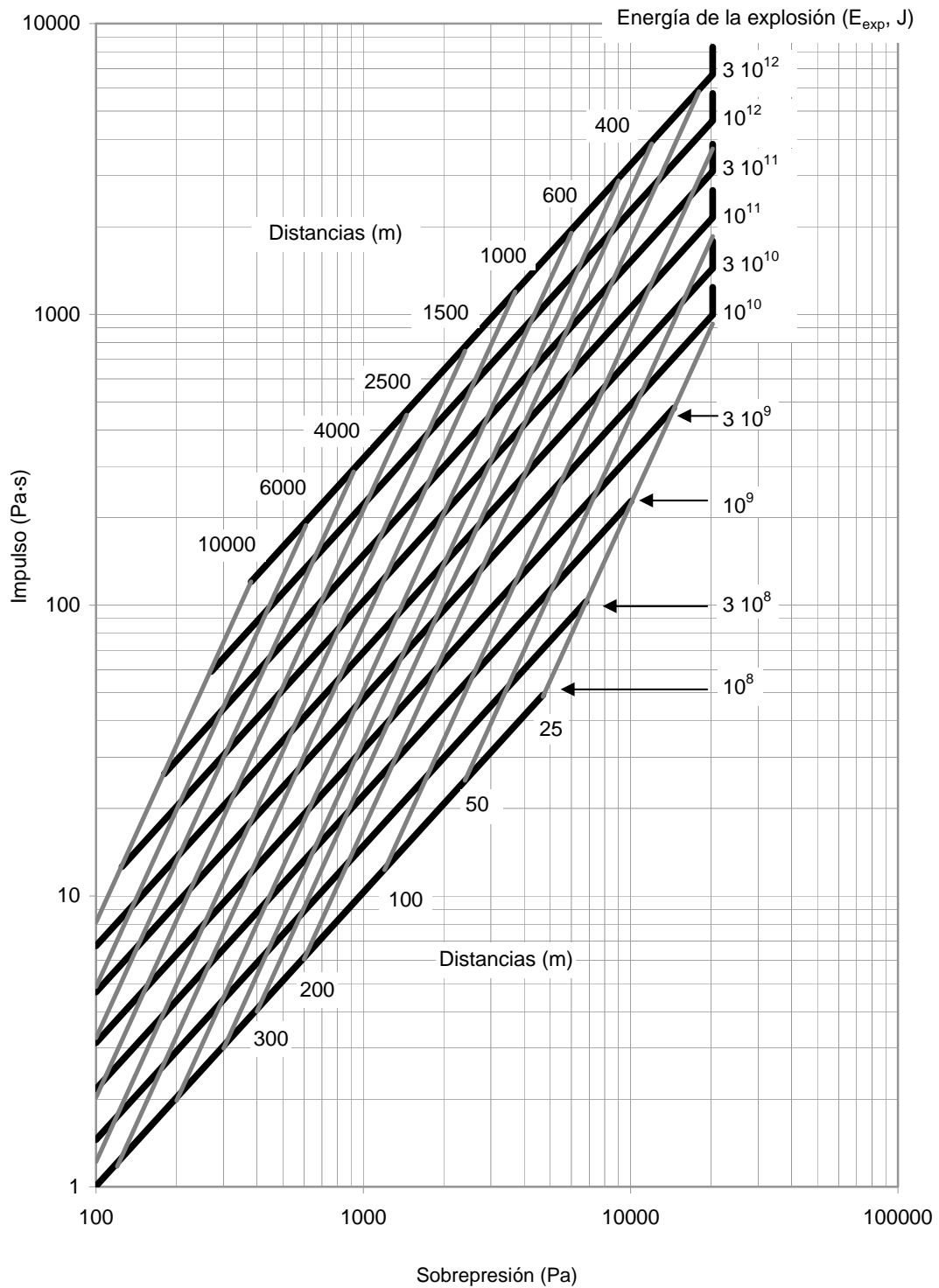


FIGURA 4.10. “Características” de la explosión de nubes con diferentes energías para el nivel de explosión 5, utilizando el modelo de Multienergía

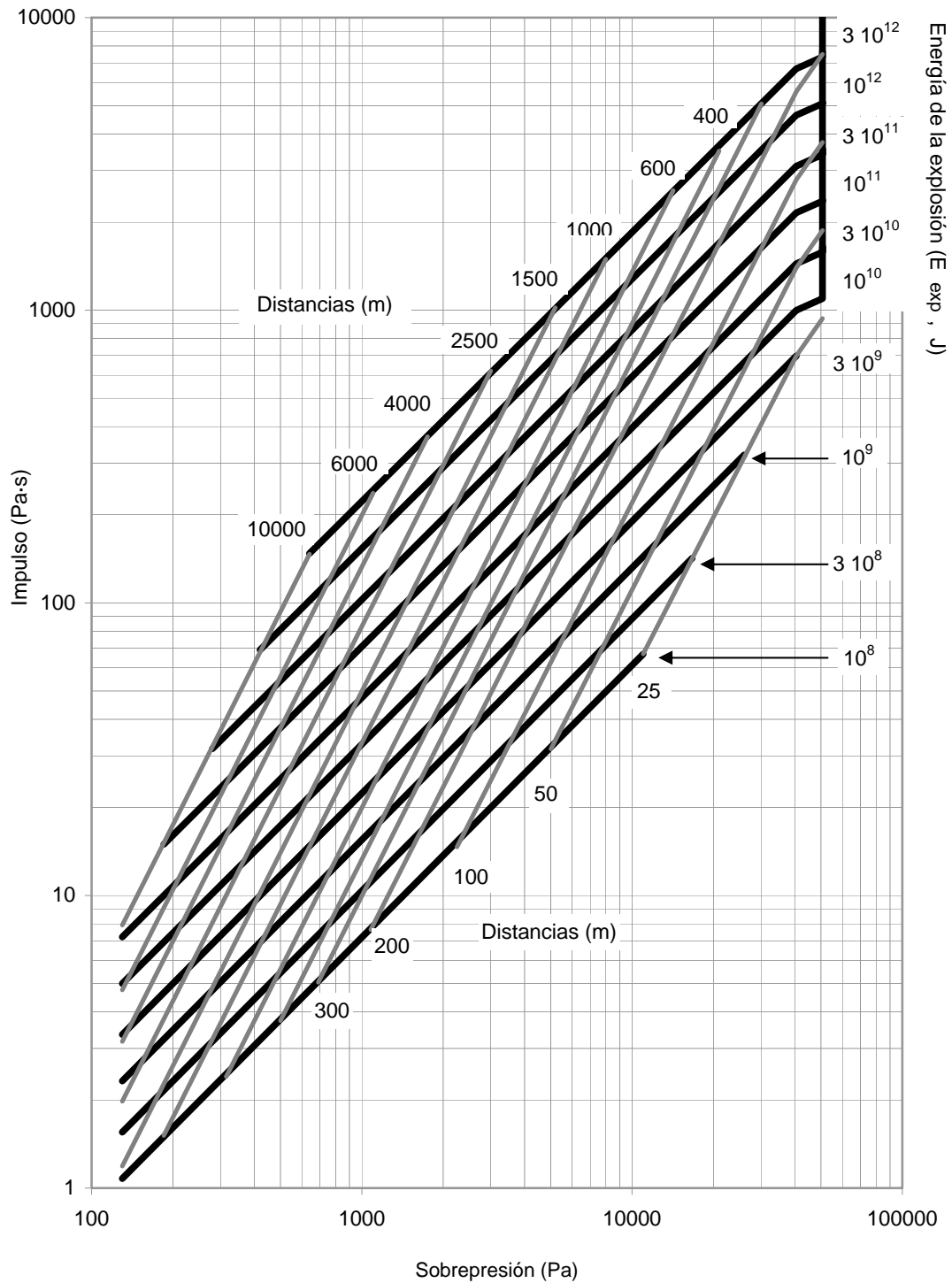


FIGURA 4.11. “Características” de la explosión de nubes con diferentes energías para los niveles de explosión 6, utilizando el modelo de Multienergía

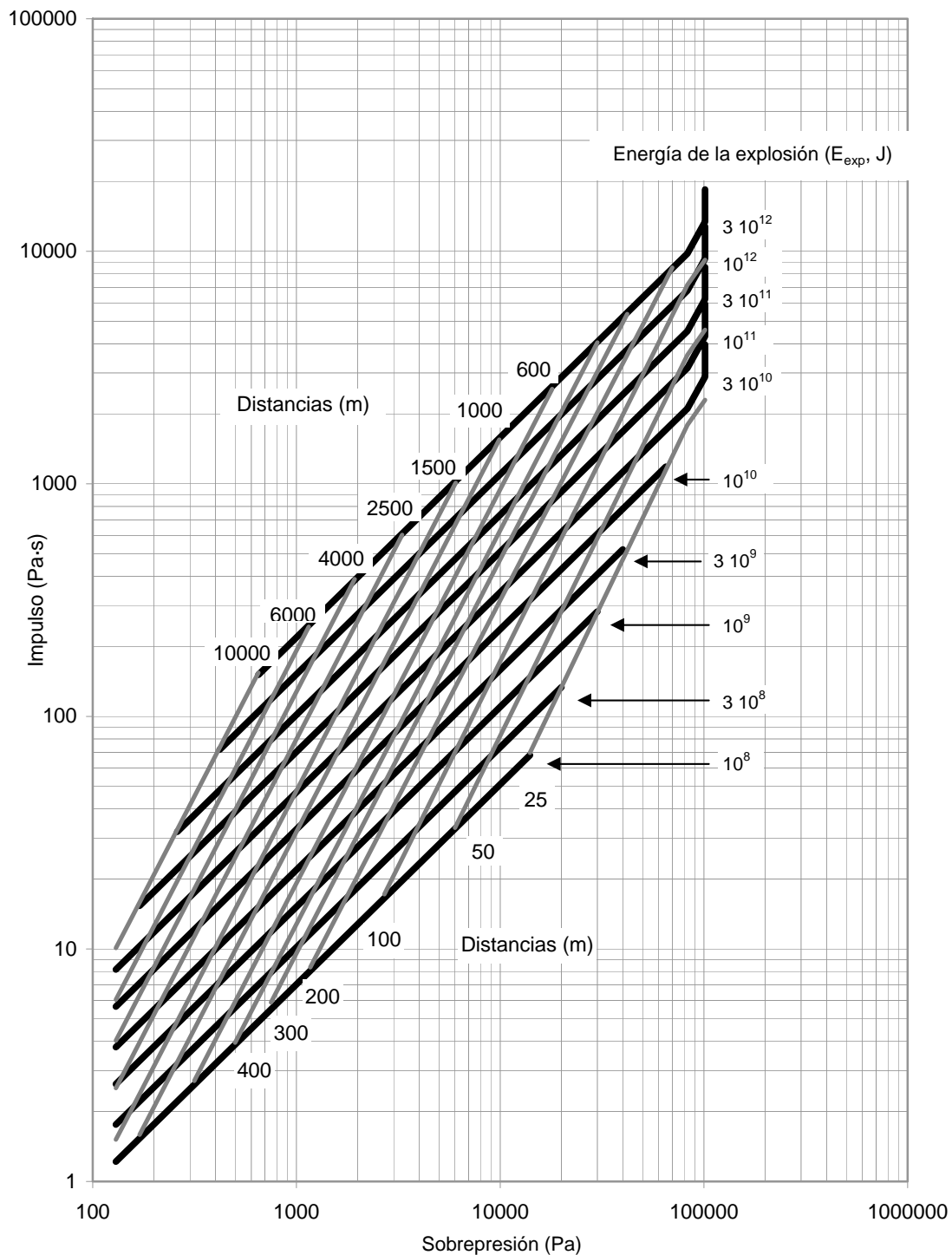


FIGURA 4.12. “Características” de la explosión de nubes con diferentes energías para los niveles de explosión 7, utilizando el modelo de Multienergía

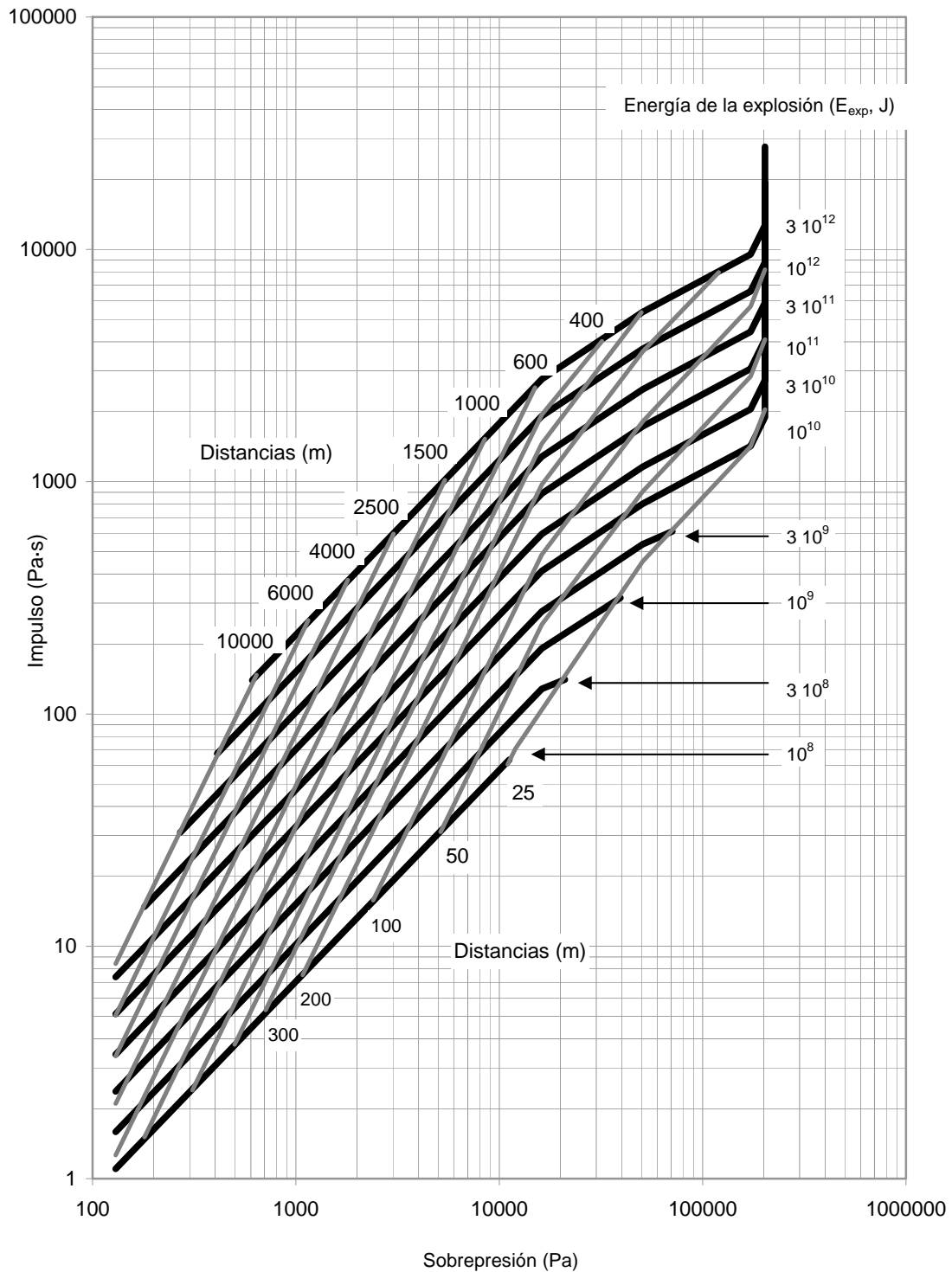


FIGURA 4.13. “Características” de la explosión de nubes con diferentes energías para los niveles de explosión 8, utilizando el modelo de Multienergía

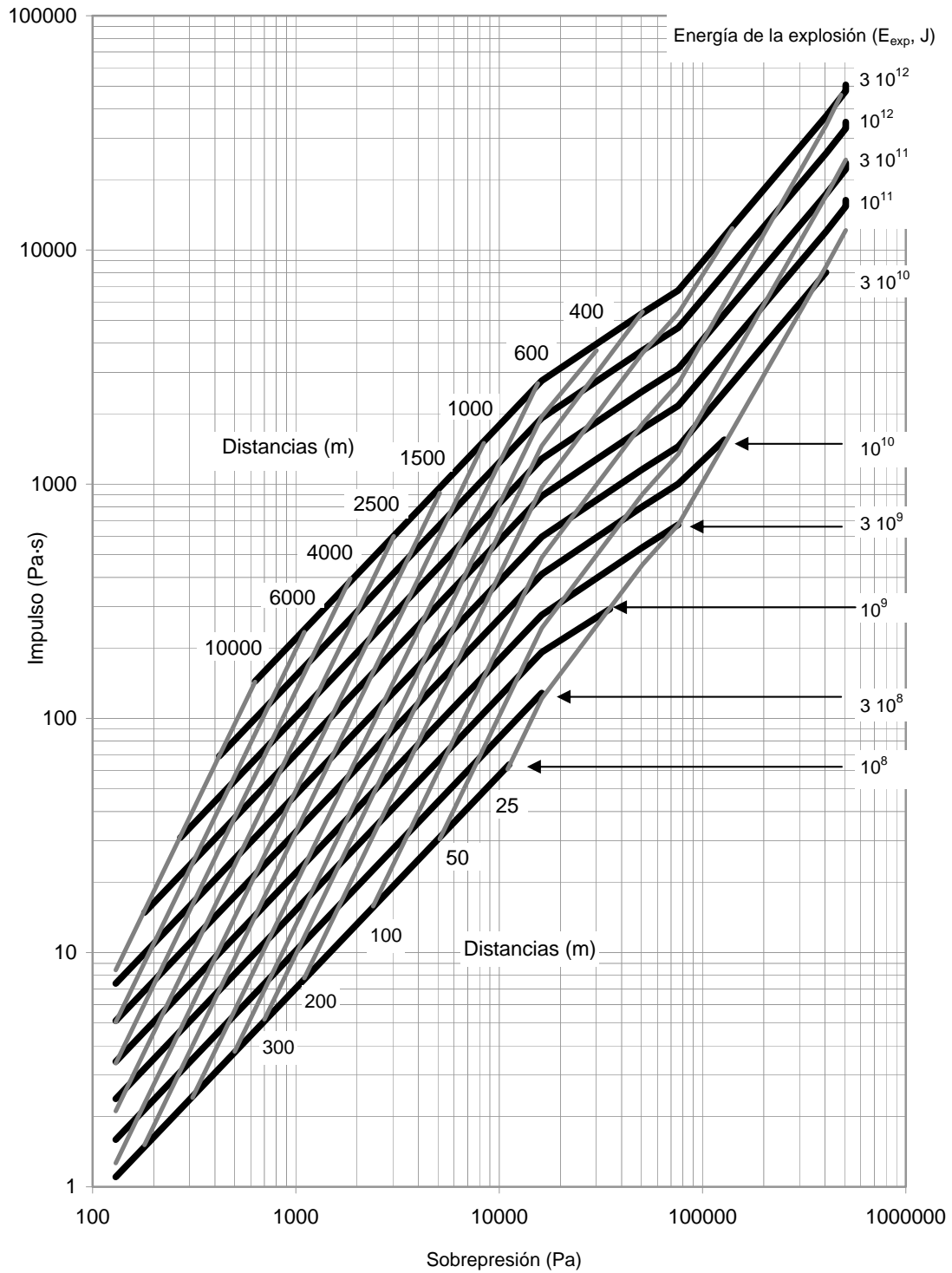


FIGURA 4.14. “Características” de la explosión de nubes con diferentes energías para los niveles de explosión 9, utilizando el modelo de Multienergía

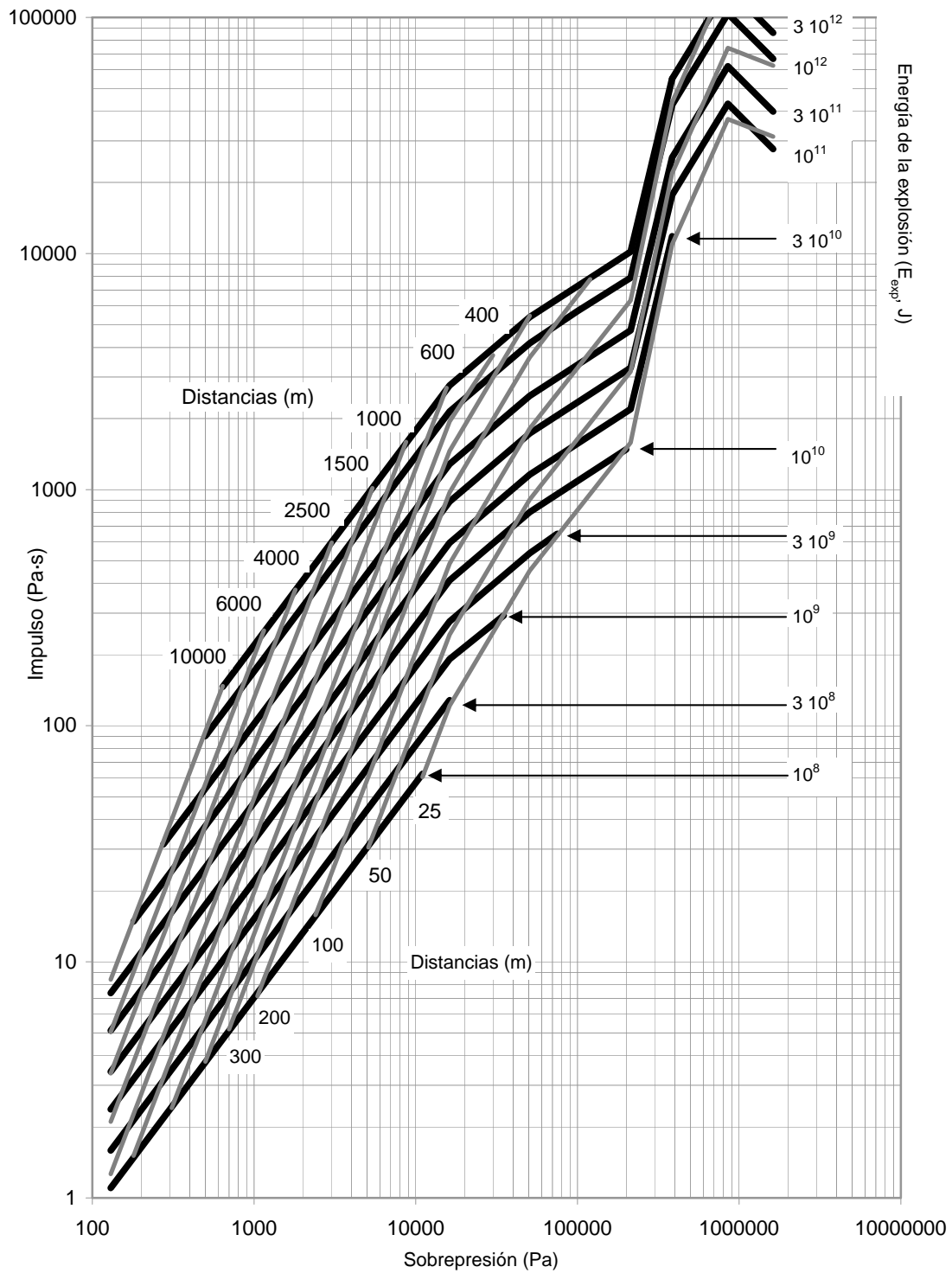


FIGURA 4.15. “Características” de la explosión de nubes con diferentes energías para los niveles de explosión 10, utilizando el modelo de Multienergía

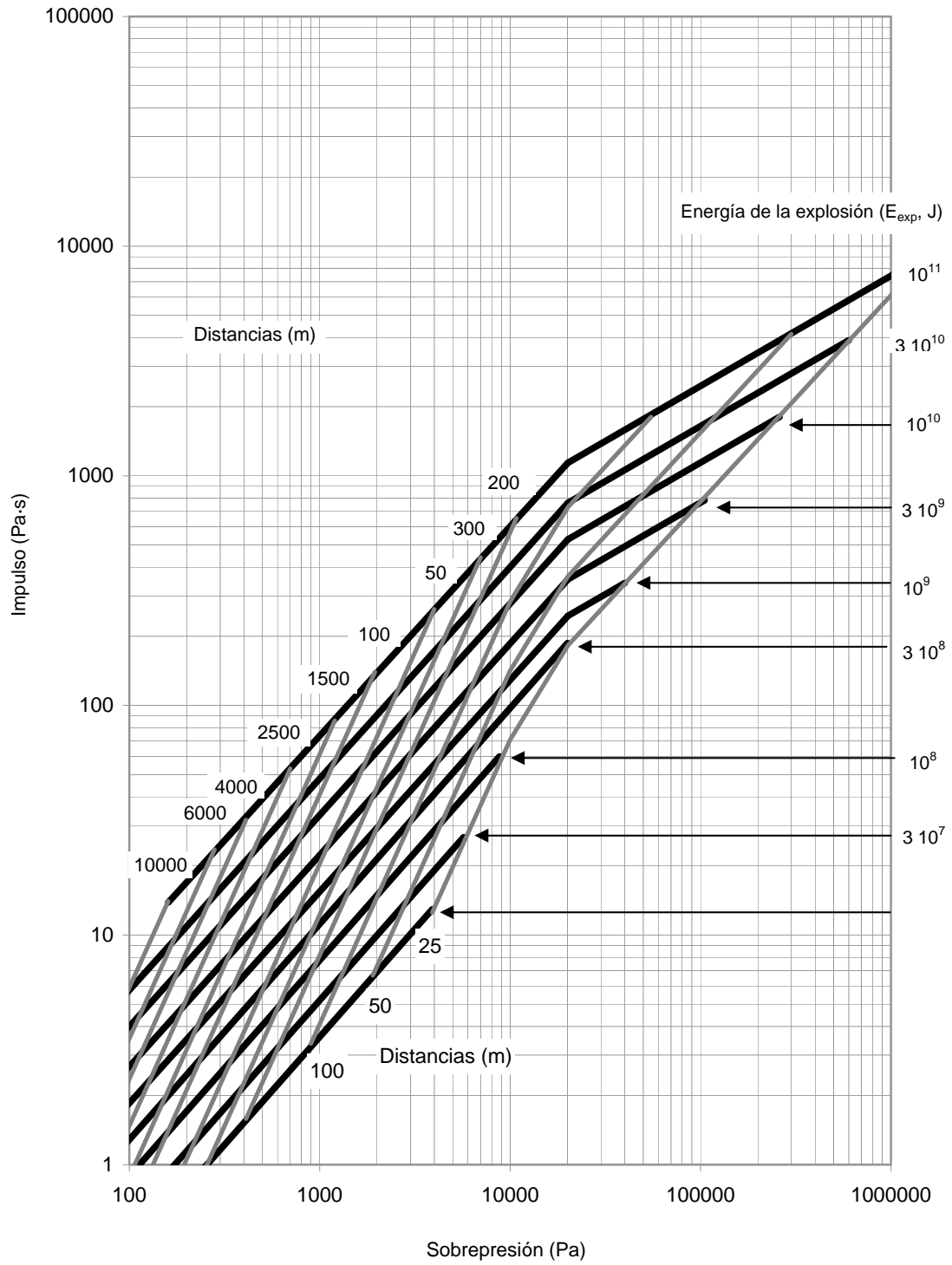


FIGURA 4.16. “Características” del estallido de recipientes esféricos con diferentes energías utilizando el modelo de Baker

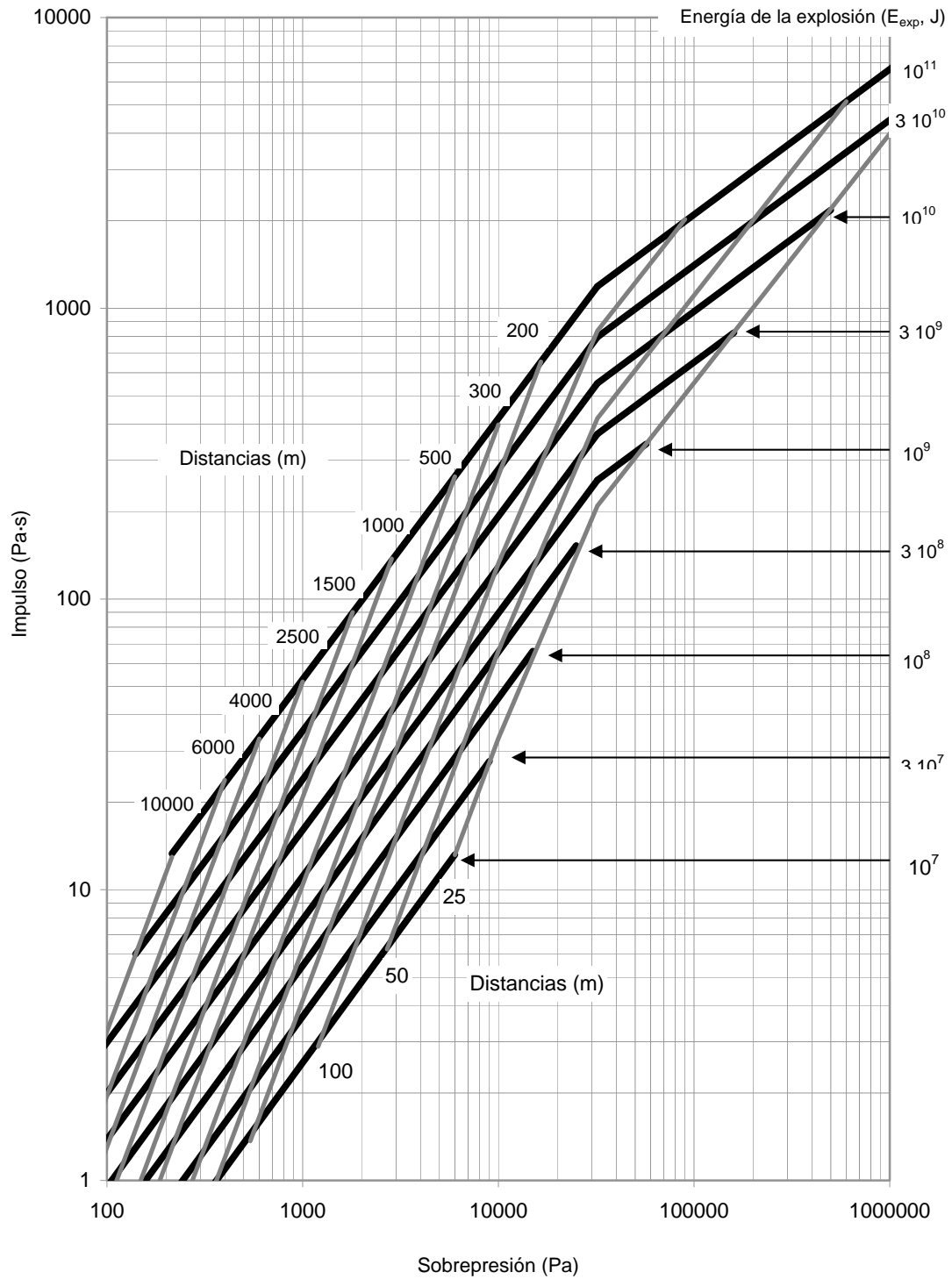


FIGURA 4.17. “Características” del estallido de recipientes cilíndricos con diferentes energías utilizando el modelo de Baker

4.3. EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LOS DAÑOS PROVOCADOS POR LAS EXPLOSIONES

En el capítulo 3 se han comentado de forma individualizada los posibles daños provocados por las explosiones sobre seres humanos, edificaciones y estructuras, pero la evaluación de consecuencias debe llevarse a cabo teniendo en cuenta que dichos daños pueden darse de forma conjunta y simultánea. En este sentido, en la figura 4.18 se representan los daños primarios provocados por la incidencia directa de las ondas explosivas sobre los seres humanos y en la figura 4.19 los que se producirían por la rotura de elementos constructivos (ventanas, paredes, techos, estructuras...) que podrían afectar a las personas en el interior o cerca de las edificaciones afectadas. Ambas figuras han sido obtenidas por medio de las funciones PROBIT seleccionadas en el capítulo 3 (ecuaciones 3.2, 3.9, 3.16 y 3.18 para la figura 4.18 y ecuaciones 3.19-3.21 para la figura 4.19).

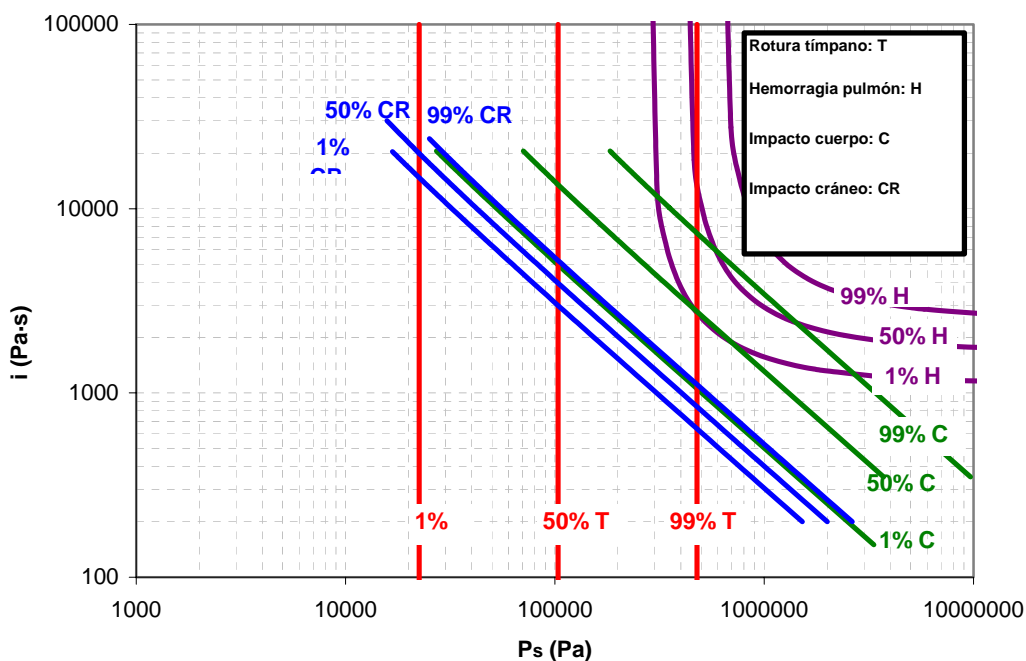


FIGURA 4.18. Daños más importantes provocados por la incidencia directa de las ondas sobre los seres humanos

A partir de la figura 4.18 se deduce:

1. El orden de ocurrencia de daños conforme aumenta la sobrepresión y/o el impulso es el siguiente:

1. Rotura timpánica.

2. Desplazamiento, caída e impacto del cuerpo o del cráneo con elementos fijos.
 3. Hemorragia pulmonar.
2. No obstante, los daños citados pueden producirse simultáneamente. Así, con sobrepresiones de 10^5 Pa e impulsos de 5000 Pa·s la mitad de la población puede sufrir rotura timpánica, el 1% muerte por caída e impacto del cuerpo (1%) o del cráneo (99%) con el suelo u otros elementos. Pero para los valores de sobrepresión que ocasionarían bajos porcentajes de rotura timpánica (22500 Pa para el 1% y 45000 Pa para el 10%) no se producirían caídas e impactos sobre el suelo, ya que los impulsos necesarios para ello no se producen en las explosiones reales con los valores de sobrepresión antes citados (ver apartado 4.2). Por otro lado, para que se produzcan los primeros daños sobre los pulmones (del 1 al 10%) sería preciso que los valores de sobrepresión e impulso fuesen muy elevados, superando los que ocasionarían la práctica totalidad de roturas timpánicas y más del 50% de impactos.

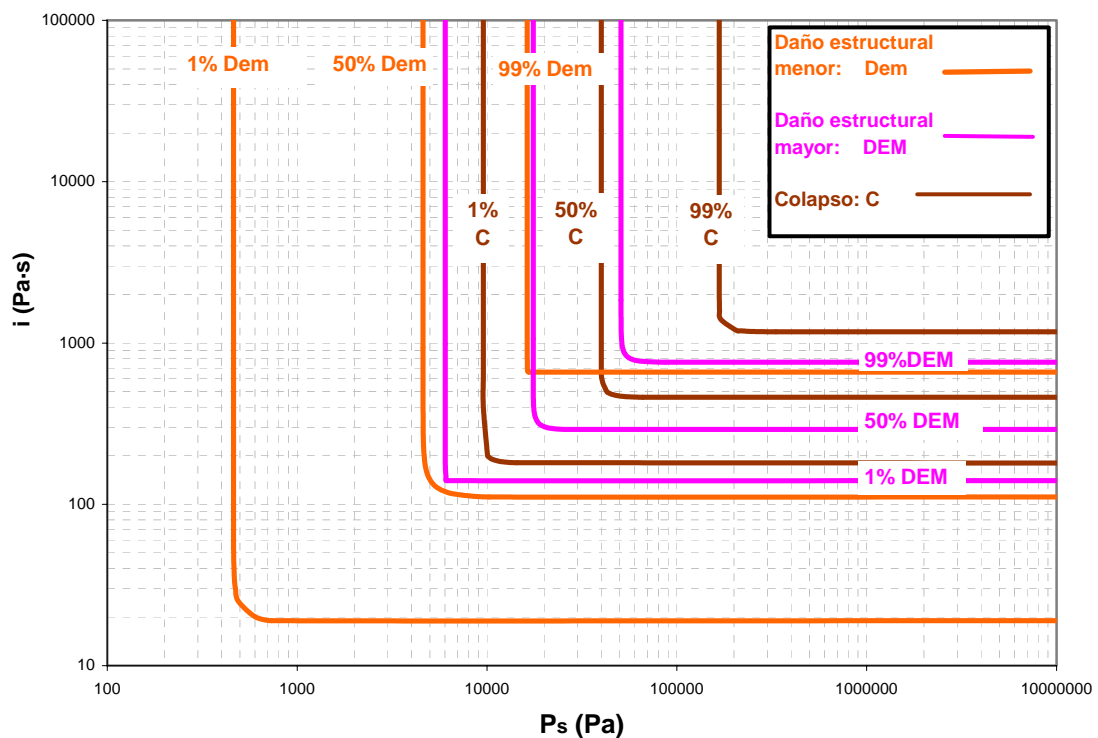


FIGURA 4.19. Daños más importantes provocados por las ondas de presión sobre las edificaciones

Respecto a los daños a edificaciones y con referencia a la figura 4.19 se deduce:

1. Los primeros daños estructurales se producen a niveles de sobrepresión e impulso muy inferiores a los que provocarían la rotura timpánica, confirmándose que las estructuras presentan menor capacidad resistente a las explosiones que los seres humanos. Así, a sobrepresiones comprendidas entre 500 y 5000 Pa se producirían daños estructurales menores para el 1% y 50% de las edificaciones, respectivamente, muy inferiores a la sobrepresión que produciría el 1% de rotura timpánica (22500 Pa). Para este último valor de sobrepresión se produciría el colapso (derrumbamiento) del 20% de los edificios.
2. Según lo anterior, los daños esperables sobre los seres humanos dependen de la ubicación de los mismos en el interior o exterior de edificios.

Además de los daños citados deben considerarse también los que pueden provocar los impactos de los proyectiles, antes comentados.

4.4. ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS.

Si en el diagrama impulso-sobrepresión donde se representan las líneas de isorriesgo se incluye también la *característica* de la explosión analizada (apartado 4.1), los puntos de corte de ambas funciones determinan los posibles daños sobre los humanos y edificaciones, que pueden expresarse en función de la distancia al origen de la explosión. En otros términos, se puede efectuar el análisis de consecuencias de forma gráfica, lo que posibilita una rápida y completa información.

Como explicación de lo anterior, en la figura 4.20 se representan las líneas de isorriesgo correspondientes a los daños directos sobre seres humanos en el exterior de edificaciones y en la figura 4.21 los probables en edificaciones, incluyéndose como ejemplo la *característica* de la explosión de una nube de vapor, con un nivel 10 y una energía de $1.42 \cdot 10^{11}$ J (que es la décima parte de la estimada en la explosión de Flixborough, en 1974). El análisis de consecuencias se lleva a cabo a partir de 40 metros del centro de la nube, dado que hasta dicha distancia la mortalidad por efectos térmicos (combustión de la nube) es total. En la tabla 4.11 se resume el análisis de consecuencias para este accidente.

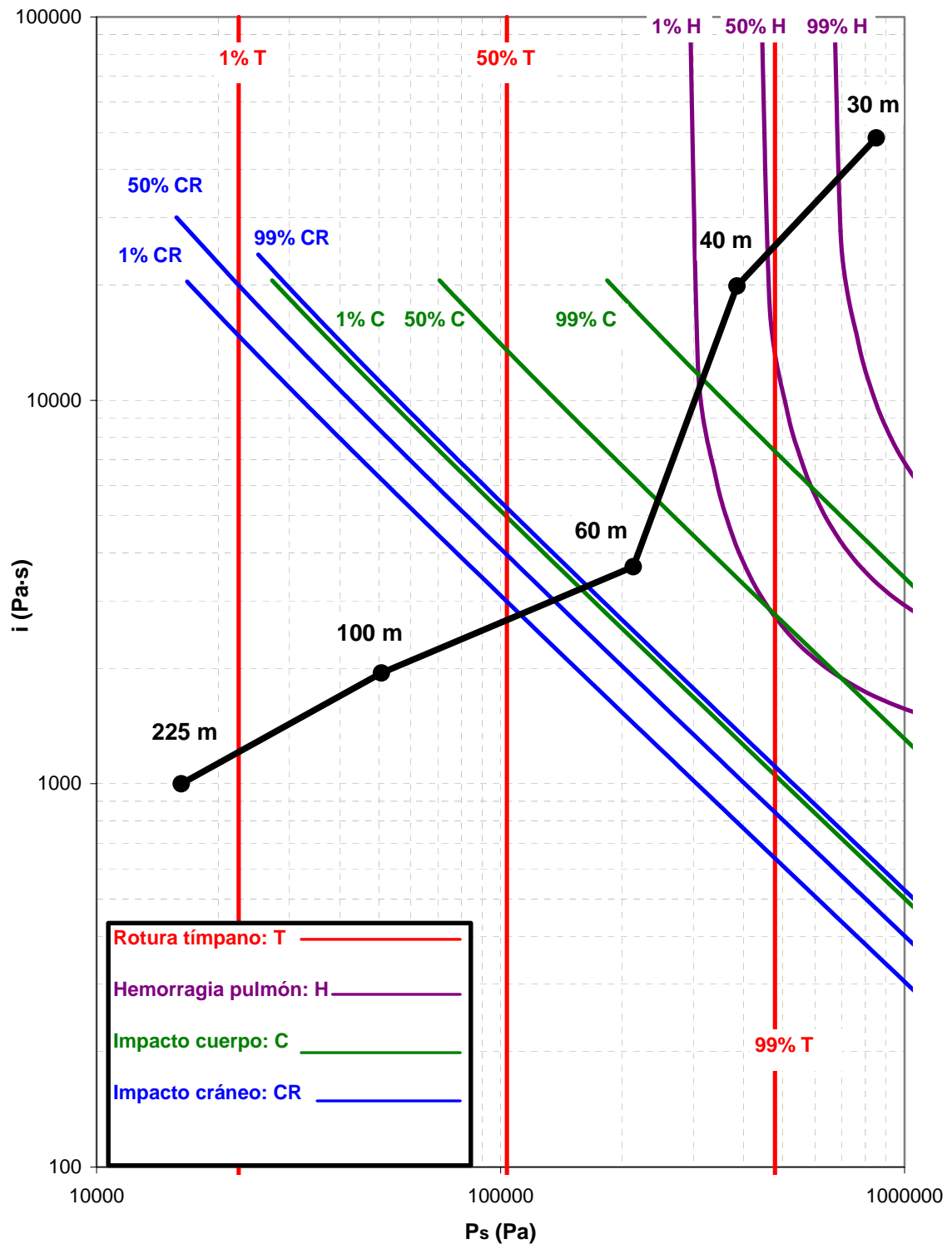


FIGURA 4.20. Análisis de consecuencias de la explosión descrita en el apartado 4.4 sobre los seres humanos en el exterior de edificios, determinadas por los puntos de corte de la “característica” de la explosión y las líneas de isorriesgo.

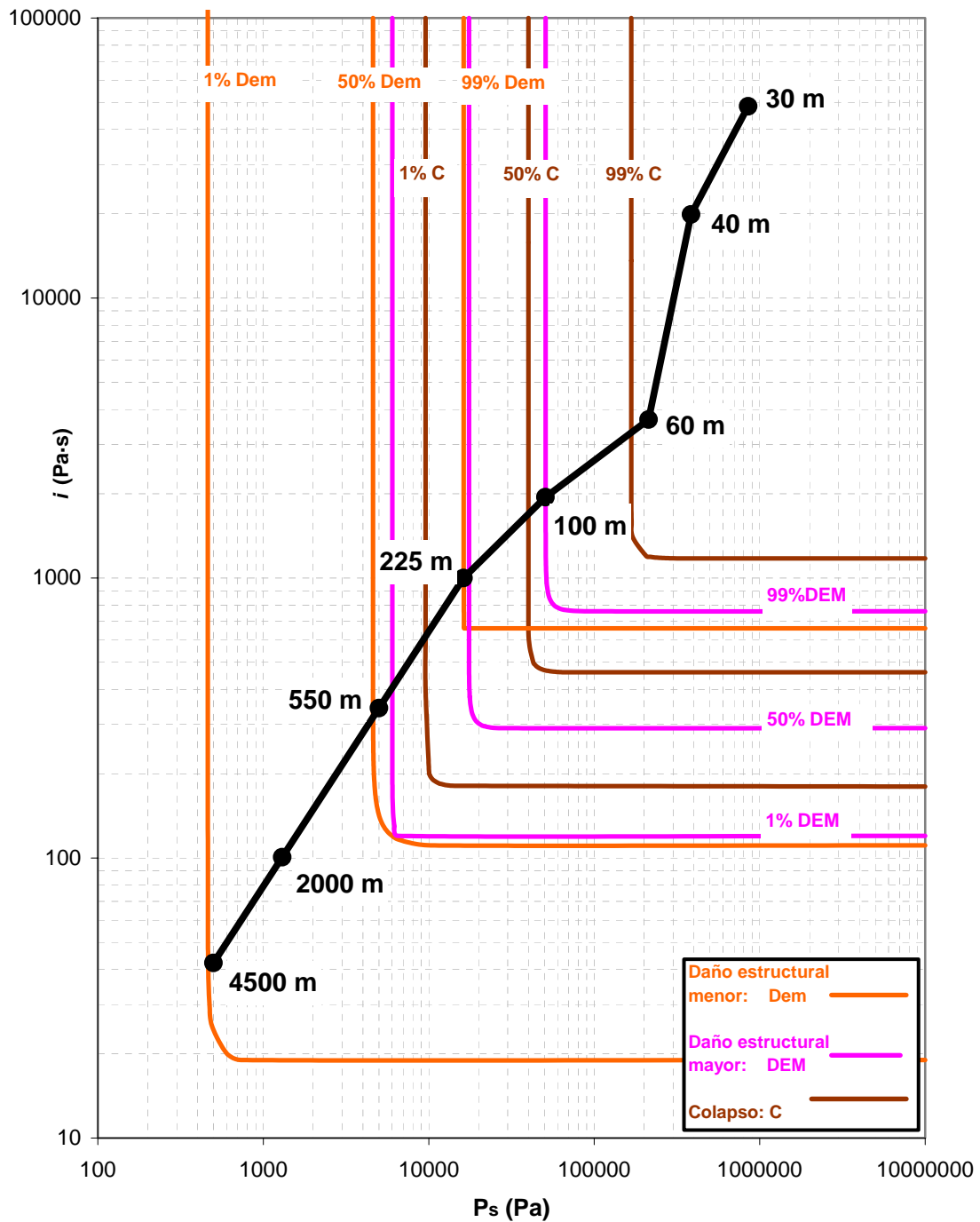


FIGURA 4.21. Análisis de consecuencias de la explosión descrita en el apartado 4.4 sobre edificios, determinadas por los puntos de corte de la “característica” de la explosión y las líneas de isorriesgo.

TABLA 4.11. Análisis de consecuencias de la explosión del ejemplo del apartado 4.4 a diferentes distancias

Distancia (m)	Consecuencias directas sobre humanos	Consecuencias sobre edificios (nota 1)
30 m	Muerte: 100% (por caída e impacto) y 100% (por hemorragia pulmonar) Rotura timpánica: 100%	Colapso del 100% de los edificios
40 m	Muerte: 100% (por caída e impacto) y 17% (por hemorragia pulmonar) Rotura timpánica: 97%	Colapso del 100% de los edificios
60 m	Muerte: 100% (por caída e impacto con el cráneo) y 4% (por caída e impacto con el cuerpo) Rotura timpánica: 86%	Colapso del 100% de los edificios
100 m	Rotura timpánica: 14%	Colapso del 65% de los edificios y daño estructural mayor en el 35% restante
225 m	Rotura timpánica: 1%	Colapso del 7% de los edificios, daño estructural mayor en el 36%, daño estructural menor en otro 47% y no dañados el 10% restante
550 m	Ninguna	Daño estructural mayor en el 1%, daño estructural menor en el 49% y el 50% restante no presenta daños apreciables
2000 m	Ninguna	Daño estructural menor en el 10% de los edificios y el 90% restante sin daños
4500 m	Ninguna	Daño estructural menor en edificios: 1% No dañados: 99%

Nota 1: Los niveles de daño superiores en los edificios están incluidos en los inferiores, por lo que los porcentajes de estos últimos se han de calcular por diferencia (ver anexo IV).

Respecto a las consecuencias de la tabla 4.11, conviene destacar que los daños a los seres humanos dejan de producirse cuando todavía los sufren los edificios, lo que indica la mayor sensibilidad de estos últimos frente a las explosiones, como se ha comentado anteriormente.

CAPÍTULO 5. ZONAS DE PLANIFICACIÓN

Los riesgos derivados de las atmósferas explosivas en el lugar de trabajo se encuentran regulados en el Real Decreto 681/2003, de 12 de junio, *sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo*. En cuanto a los sistemas de protección en atmósferas explosivas, se encuentran recogidos en la Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo 94/9/CE (ATEX), *relativa a los aparatos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas*, incorporada al ordenamiento jurídico español por el Real Decreto 400/1996, de 1 de marzo. Esta reglamentación está fundamentalmente dirigida a la prevención de explosiones en el ámbito laboral, por lo que sus objetivos se salen fuera de los planteados en este trabajo, dado que se pretende aquí evaluar accidentes de gran alcance, que superen incluso los límites geográficos de las instalaciones afectadas.

5.1. ANÁLISIS DE LOS VALORES UMBRAL PARA ZONAS DE PLANIFICACIÓN PROPUESTOS EN LA LEGISLACIÓN ESPAÑOLA.

Los valores umbral para establecer las Zonas de Planificación ante el riesgo de explosiones accidentales en la industria están contenidos en la *Directriz Básica (2003)*, habiéndose considerado las magnitudes peligrosas provocadas por este tipo de accidente, esto es: la sobrepresión, el impulso mecánico y el alcance de fragmentos -tabla 5.1-.

TABLA 5.1. Valores umbral propuestos en la *Directriz Básica (2003)* para las Zonas de Intervención y Alerta

	Límite de Intervención	Límite de Alerta
Sobrepresión	12500 Pa	5000 Pa
Impulso	15000 Pa·s	10000 Pa·s
Alcance de los fragmentos	95% con impulso superior a 10 mbar·s	99.9% con impulso superior a 10 mbar·s

5.1.1. Análisis de los valores límite de la sobrepresión y del impulso de las explosiones.

Los valores límite de la sobrepresión y del impulso de la tabla 5.1 se han representado en las figuras 5.1 y 5.2 conjuntamente con las líneas de isorriesgo para seres humanos situados en ámbitos exteriores (figura 5.1) y las que definen los daños a edificios, que, a su vez, pueden afectar a sus moradores (figura 5.2). En ambos casos se incluye la *característica* de la explosión accidental que, en la práctica, puede considerarse razonablemente de máximo nivel -ver apartado 4.3-.

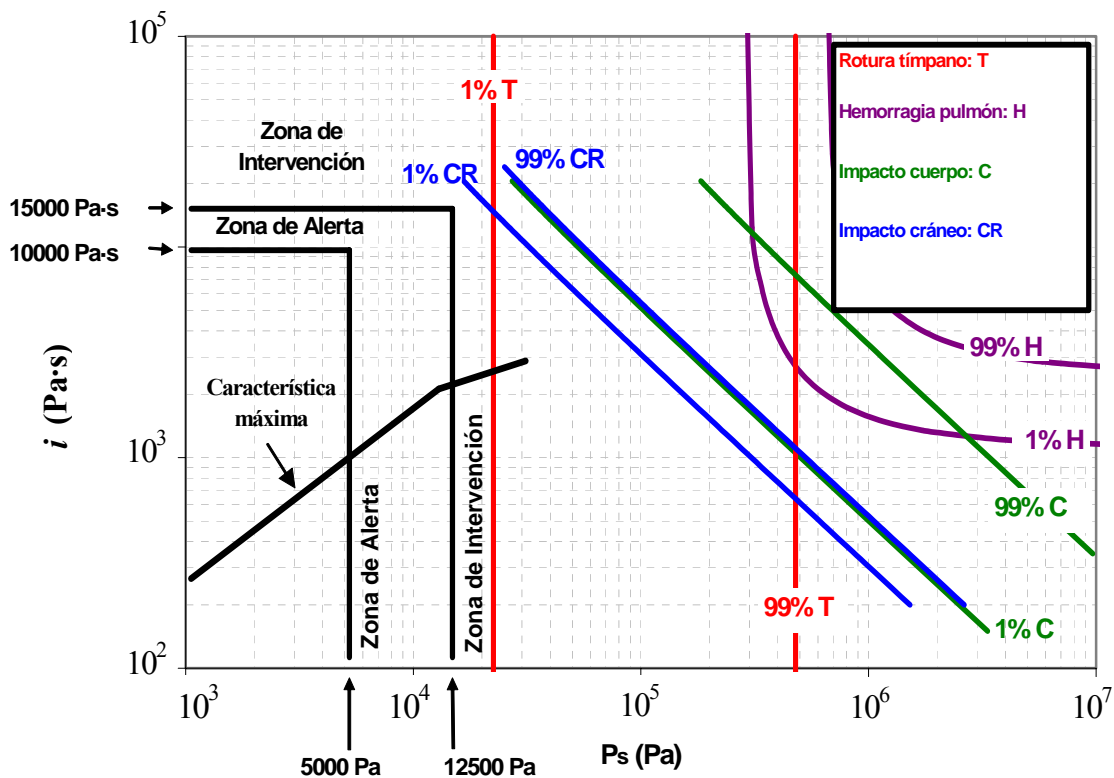


FIGURA 5.1. Representación conjunta de los valores límite de sobrepresión e impulso establecidos en la Directriz Básica (2003), de las líneas de isorriesgo más significativas para humanos y de la “característica” de la explosión de máximo nivel

Con relación a la figura 5.1 se observa:

Para Intervención:

1. El valor límite de la sobrepresión para delimitar inferiormente esta zona, 12500 Pa, en cuanto a los daños directos a los seres humanos es muy conservador, dado que los primeros efectos (1% de rotura de tímpano) se producirán a 22500 Pa, que casi duplica al anterior.
2. El valor límite del impulso mecánico, 15000 Pa·s, está situado por encima de la característica de la explosión considerada como de máximo nivel, razonablemente posible (ver apartado 4.2). Esto es, aunque dicho impulso puede producirse en una explosión real se daría a partir de, aproximadamente, 100000 Pa que es el punto de corte del impulso citado con la *característica* de la

explosión “máxima”, por lo que la Zona estaría condicionada siempre por el valor límite de sobrepresión antes citado. En otros términos: la distancia al origen de cualquier explosión donde se produjera 15000 Pa·s sería siempre menor a la que correspondería la sobrepresión de 12500 Pa.

Para Alerta:

1. El valor límite de la sobrepresión, 5000 Pa, en cuanto a los daños directos a los seres humanos resulta también muy conservador.
2. Las observaciones sobre el valor límite del impulso mecánico son las mismas que las indicadas para el caso de la zona de Intervención, por lo que, en la práctica, la zona está condicionada siempre por el límite de la sobrepresión (5000 Pa) y, por consiguiente, el valor límite del impulso establecido no tiene aplicación en las explosiones reales.

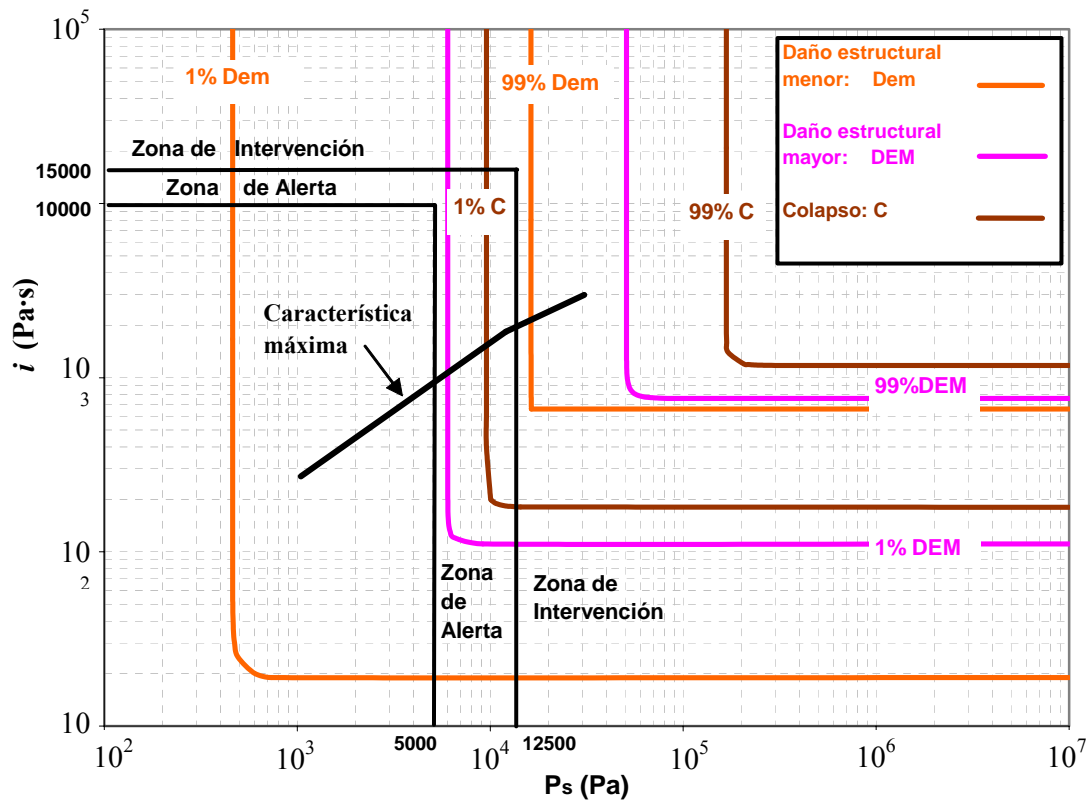


FIGURA 5.2. Representación conjunta de los valores límite de sobrepresión e impulso establecidos en la Directriz Básica (2003), de las líneas de isorriesgo más significativas para edificaciones y de la “característica” de la explosión de máximo nivel

Con relación a la figura 5.2, se observan condiciones y características diferentes a las comentadas anteriormente, destacando lo siguiente:

1. En la zona de Alerta, limitada por las distancias que correspondan a las sobrepresiones de 12500 y 5000 Pa, se producirían los siguientes efectos:
 - En el límite superior citado, hasta el 3% de los edificios podrían colapsar, el 20% sufriría daños mayores (derrumbamiento de paredes, tejados, etc) y el 62% presentaría daños estructurales menores.
 - En el límite inferior de sobrepresión el 1% de los edificios sufrirían daños mayores y el 52% daños menores.

Es evidente que estos daños no deben ser aceptados dentro de la zona de Alerta.

2. También en este caso los valores límite del impulso establecidos para Intervención y Alerta están por encima de la *característica* de la explosión de máximo nivel que razonablemente puede tener lugar en las industrias convencionales, por lo que no son realistas para la determinación de estas Zonas.

5.1.2. Análisis de los valores límite de los fragmentos generados en la explosión de recipientes.

Para analizar los valores límite de los fragmentos generados en el estallido de recipientes industriales conviene tener en cuenta las roturas más frecuentes de este tipo de contenedores. Como se indica en el apartado 2.6, el número habitual de fragmentos generados no suele superar 10 ó 20, insuficiente para realizar un estudio estadístico del alcance de los mismos, por lo que no conviene expresar los valores límite en función de determinados porcentajes del número de fragmentos formados. Por otro lado, respecto a considerar únicamente los fragmentos que superen 10 mbar·s, se indica en el apartado 3.3 que es posible la formación de fragmentos con impulsos inferiores a dicho valor que alcancen distancias considerables y que superen ampliamente los criterios de daño indicados en el apartado 3.1.5, lo que conlleva una gran peligrosidad. Por tanto, en lugar de considerar el impulso de los fragmentos resulta aconsejable tener en cuenta únicamente su alcance máximo, puesto que cualquier fragmento generado en el estallido de recipientes industriales supone un riesgo potencial muy elevado, que debe ser tenido en cuenta para establecer las Zonas de Planificación.

5.2. CRITERIOS PARA ESTABLECER NUEVOS VALORES LÍMITE PARA ZONAS DE PLANIFICACIÓN COMO CONSECUENCIA DE EXPLOSIONES ACCIDENTALES EN LA INDUSTRIA

Los valores límite propuestos están basados en los criterios siguientes:

1. Las zonas de Intervención y Alerta se definen en la Directriz Básica (2003) como sigue:

La primera “es aquella en la que las consecuencias de los accidentes producen un nivel de daños que justifica la aplicación inmediata de medidas de protección”; y la segunda “es aquella en la que las consecuencias de los accidentes provocan efectos que, aunque perceptibles por la población, no justifican la intervención, excepto para los grupos críticos de población”.

Según estas definiciones, en la zona de Alerta no deben producirse daños significativos, por lo que los valores límite deben ser establecidos de acuerdo con este criterio. Los índices de otras tipologías accidentales (incendios y nubes tóxicas) siguen también este planteamiento, aunque señalando específicamente que en la zona de Alerta podrían resultar afectadas personas especialmente vulnerables o hipersensibles.

2. Tal y como se ha indicado en apartados anteriores, las edificaciones son más vulnerables a las explosiones que los seres humanos, por lo que a la hora de establecer las Zonas de Planificación, debe tenerse en cuenta este aspecto. Así, la planificación en el exterior de una industria aislada, sin edificaciones próximas, debería hacerse utilizando valores límite aplicables a los seres humanos en exteriores. Este caso es frecuente cuando se trata de industrias ubicadas en zonas agrícolas donde puede haber un importante número de trabajadores en exteriores. Pero cuando en la zona de influencia haya edificaciones, los valores límites deben ser más restrictivos, de manera que tengan en cuenta los posibles daños indirectos a los seres humanos y los directos a las propias edificaciones.
3. La selección de los daños para delimitar las Zonas de Planificación se debe llevar a cabo teniendo en cuenta los conocimientos científicos y técnicos sobre la materia y, sobre todo, a través de la experiencia adquirida con los análisis de consecuencias de accidentes acaecidos, tal como se indica en el anexo III.

5.3. VALORES LÍMITE PROPUESTOS PARA EXPLOSIONES ACCIDENTALES

A partir de las consideraciones anteriores y las que se derivan del estudio y análisis de las consecuencias de explosiones reales - anexo III-, se proponen los valores límite siguientes:

1. Zona de Intervención. Su alcance viene delimitado por uno de los valores límite siguientes:

1.1. Si en la zona de influencia de las posibles explosiones industriales hay edificaciones se establecen las siguientes combinaciones de presión e impulso.

Una sobrepresión de **6000 Pa para impulsos iguales o superiores a 110 Pa·s.**

Un impulso de **110 Pa·s para sobrepresiones iguales o superiores a 6000 Pa.**

Estos límites corresponden a los que provocarían el 1% de daño estructural mayor en edificios convencionales. Este porcentaje y nivel de daño se considera aceptable para establecer el límite inferior de Intervención, ya que de esta manera en Alerta sólo se verían afectadas las edificaciones muy vulnerables, siguiendo el criterio antes comentado.

En el apartado 5.4 se presenta un procedimiento que permite seleccionar directamente el valor límite adecuado -sobrepresión o impulso- en función de las características de la explosión.

1.2. Si en la Zona de Intervención antes definida no hay edificaciones (sin considerar las propias de la instalación donde se pueda producir la explosión) se establece una nueva zona delimitada por la sobrepresión de **22500 Pa**. Este valor límite provocaría rotura timpánica al 1% de los seres humanos.

1.3. Si la explosión da lugar a la formación de fragmentos primarios, se determina el alcance máximo de los mismos y se compara con el alcance fijado por el valor límite anterior que corresponda, tomando como distancia de Intervención la mayor de ellas. Esta propuesta se justifica teniendo en cuenta que los modelos de cálculo que se aplican para la determinación de los citados alcances utilizan fragmentos de tamaños considerables, de manera que sus impactos sobre cualquier elemento vulnerable (ser humano o edificación) provocarían daños

muy graves -ver apartados 3.1.5 y 3.2.2-, no aceptables en la Zona de Alerta.

2. Zona de Alerta. Comienza donde termina la Zona de Intervención que corresponda, y su límite inferior queda establecido por la distancia donde se produzca alguna de las combinaciones siguientes:

Una sobrepresión de **1300 Pa.s para impulsos iguales o superiores a 40 Pa.s.**

Un impulso de **40 Pa.s para sobrepresiones iguales o superiores a 1300 Pa.** (En este caso la sobrepresión no debe sobrepasar 22500 Pa, establecida como límite inferior de Intervención).

Los límites anteriores provocarían daños menores en el 10% de las edificaciones. No se establece Zona de Alerta cuando su límite sea inferior al alcance máximo de los fragmentos.

En la figura 5.3 se representan las Zonas de Planificación relativas a los valores límite de sobrepresión e impulso.

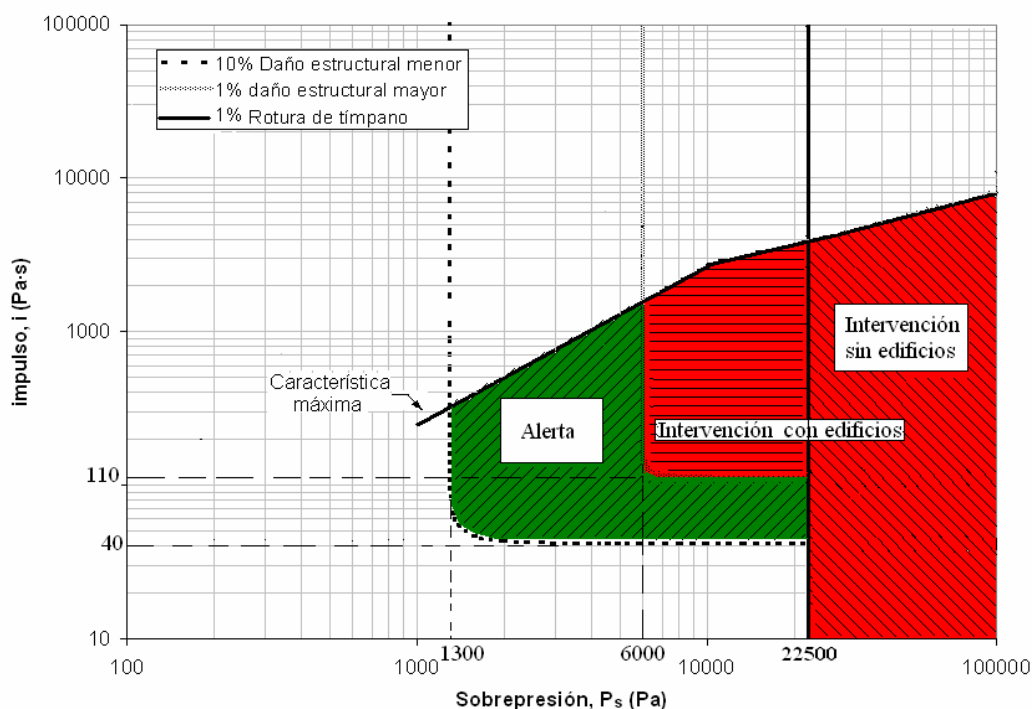


FIGURA 5.3. Representación de la Zonas de Planificación mediante los valores límite propuestos.

En la figura 5.4 se han incluido los valores límites propuestos y los umbrales de la *Directriz Básica (2003)* referidos a las ondas de presión, lo que facilita su comparación, deduciéndose:

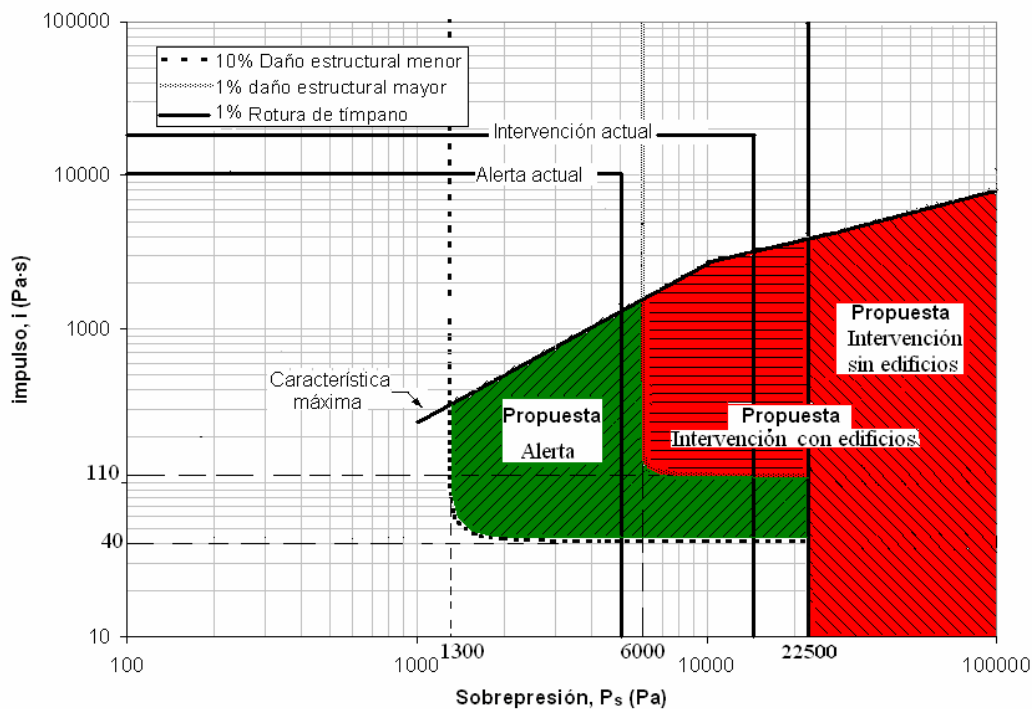


FIGURA 5.4. Valores límite actuales [Directriz Básica (2003)] y propuestos para establecer las Zonas de Planificación.

1. Los valores límite de sobrepresión e impulso promulgados en la *Directriz Básica (2003)* no corresponden a niveles de daño homogéneos, mientras que los propuestos se definen de forma conjunta mediante líneas de isorriesgo.
2. Los umbrales de la *Directriz Básica (2003)* no diferencian las ubicaciones de los seres humanos, dentro o fuera de edificios, aspecto de gran importancia.
3. El valor de la sobrepresión que delimita la Zona de Alerta en la *Directriz Básica (2003)* es próximo al establecido para la Zona de Intervención en interiores de edificios, lo que significa que un edificio a una distancia que no requeriría intervención según los límites actuales, probablemente la necesitaría, tal y como se justifica en este trabajo.

5.4. ELECCIÓN DEL UMBRAL QUE DETERMINA LA DISTANCIA DE PLANIFICACIÓN

Los métodos de cálculo propuestos en el anexo I permiten determinar la distancia a la cual se alcanzarían los umbrales definidos en el apartado 5.3 (6000 Pa y 110 Pa·s para Intervención con edificios y 1300 Pa y 40 Pa·s para Alerta). Además, en ninguna de estas Zonas puede sobrepasarse el umbral de 22500 Pa, correspondiente al 1% de rotura timpánica, que define la Zona de Intervención en exteriores sin edificios. La posición de la *característica* de la explosión respecto al umbral determina la distancia de planificación; así, en la figura 5.5 se han representado varias posibilidades de puntos de corte de distintas *características* (A, B, C ó D) con los umbrales de sobrepresión o impulso establecidos para la Zona de Planificación que se trate, además del umbral de 22500 Pa, que no debe sobrepasarse en ninguna de ellas.

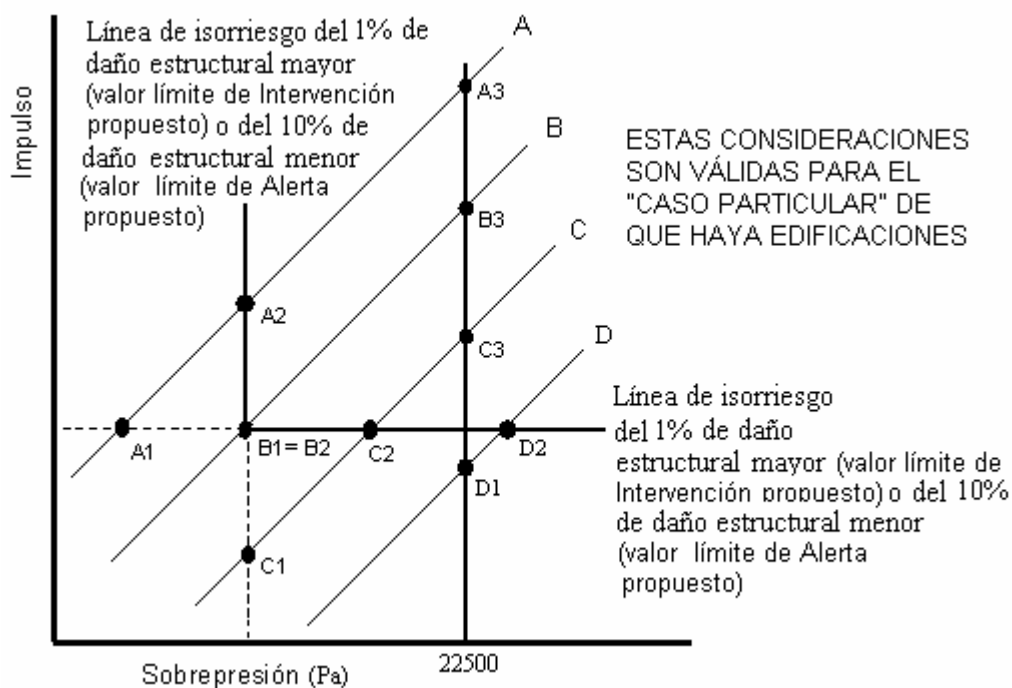


FIGURA 5.5. Posibilidades de corte de varias características de explosiones (A, B, C y D) y las líneas de isorriesgo

Para la *característica* A se obtienen tres puntos de corte, A1, A2 y A3, correspondientes a los umbrales de impulso, sobrepresión y a 22500 Pa, respectivamente. De ellos, el A2 es el que realmente pertenece al criterio de riesgo (corta la línea de isorriesgo y no supera 22500 Pa). En este caso, la distancia de planificación es la calculada a través del **umbral de sobrepresión** (6000 ó 1300 Pa, para Intervención o Alerta, respectivamente). Este comportamiento ocurre cuando la masa de TNT equivalente o la energía de la explosión es elevada.

La *característica* B es el único caso en el que la distancia de planificación es la misma, tanto a partir del **umbral de sobrepresión** (6000 ó 1300 Pa), como de **impulso** (110 ó 40 Pa·s).

Si la *característica* es la C, el punto C2 es el representativo y la distancia de planificación es la calculada a través del **umbral de impulso**.

La *característica* D alcanza la **sobrepresión de 22500 Pa** a una distancia superior a la obtenida con el umbral de impulso, por lo que el punto representativo es el D1, y la distancia de planificación se calcula con la sobrepresión citada que ocasionaría el 1% de rotura timpánica. Cabe destacar que esta posibilidad sólo se produce cuando la energía de la explosión o la masa de TNT equivalente son muy pequeñas.

Así pues, la elección del umbral depende de la posición de la *característica* de la explosión con respecto a la línea de isorriesgo correspondiente. Esta posición depende, como se comenta en el apartado 4.1, de la masa equivalente de TNT (W_{TNT}) o de la energía de la explosión (E_{exp}), según el método utilizado. Esto demuestra la existencia de intervalos de W_{TNT} ó de E_{exp} que determinan el umbral para cada escenario. Para obtenerlos es necesario parametrizar las curvas de impulso de cada método (puesto que se debe recurrir a ellas en el proceso de cálculo de distancias de planificación, tal y como se indica en los apartados 5.5.1 a 5.5.3) en el tramo al que pertenecen las distancias de planificación, mostrándose las ecuaciones utilizadas en la tabla 5.2.

TABLA 5.2. Ecuaciones de las curvas de impulso para cada uno de los métodos

Método de cálculo	Ecuación de impulso	Dominio
TNT equivalente	$i_{TNT} = 204 z'^{(-0.885)}$ (5.1)	$7 \leq z' \leq 70$
Multienergía (N = 3)	$i' = 6.05 \cdot 10^{-2} R'^{(-0.99)}$ (5.2)	$0.6 \leq R' \leq 2.4$
Multienergía (N = 4)	$i' = 6.8 \cdot 10^{-2} R'^{(-0.975)}$ (5.3)	$0.6 \leq R' \leq 5$
Multienergía (N = 5)	$i' = 8.5 \cdot 10^{-2} R'^{(-1.001)}$ (5.4)	$0.6 \leq R' \leq 9$
Multienergía (N = 6-10)	$i' = 0.11 R'^{(-1.03)}$ (5.5)	$1.5 \leq R' \leq 15$
Baker (Recipientes esféricos o cilíndricos)	$i' = 5.5 \cdot 10^{-2} R'^{(-1.05)}$ (5.6)	$1.4 \leq R' \leq 25$

En todos los ajustes se han obtenido coeficientes de regresión superiores a 0.99, lo que indica que las ecuaciones 5.1 a 5.6 se ajustan con precisión a las gráficas de las que proceden.

Para obtener los intervalos de W_{TNT} ó E_{exp} se igualan las distancias obtenidas con cada umbral, sustituyendo la correlación de impulso (figura I.3, 5.6 ó I.15) por la ecuación correspondiente de la tabla 5.2. A continuación se muestra -tablas 5.3 a 5.5- como ejemplo el procedimiento de cálculo de W_{TNT} y E_{exp} correspondientes al punto B1 = B2 de la figura 5.5 para los métodos de TNT equivalente, Multienergía (curvas 6-10) y Baker (recipientes esféricos), calculándose el resto mediante el mismo procedimiento e indicándose los resultados obtenidos en la tabla 5.6.

TABLA 5.3. Procedimiento de obtención de la masa de TNT equivalente que proporciona la misma distancia de Intervención con edificios, tanto a partir del umbral de sobrepresión de 6000 Pa como del impulso de 110 Pa·s

Distancia de Intervención a partir del umbral de 6000 Pa. (ec. 5.14)	Igualando las ecuaciones 5.1 y 5.15	Con las ec. I.5 y 5.7 se obtiene la expresión analítica de la distancia obtenida a partir del umbral de impulso	Igualando las distancias de las ec. 5.14 y 5.8
$r_{ZI(P)edf} = 20 W_{TNT}^{1/3}$ (5.14)	$i_{TNT} = \frac{110}{W_{TNT}^{1/3}} = 204 z'^{(-0.885)}$ (5.7)	$r_{ZI(i)edf} = \left(\frac{110 W_{TNT}^{(-0.885/3)}}{204 W_{TNT}^{1/3}} \right)^{(-1/0.885)}$ (5.8)	$W_{TNT} = 440 \text{ kg}$

TABLA 5.4. Procedimiento de obtención de la energía de la explosión (método Multienergía -curvas 6 a 10-) que proporciona la misma distancia de Intervención con edificios, tanto a partir del umbral de sobrepresión de 6000 Pa como del impulso de 110 Pa·s

Distancia de Intervención a partir del umbral de sobrepresión de 6000 Pa. (Con la ec. 5.24)	Igualando las ecuaciones 5.5 y 5.25	Con las ec. I.3 y 5.10 se obtiene la expresión analítica de la distancia obtenida a partir del umbral de impulso	Igualando las distancias de las ec. 5.9 y 5.11
$r_{ZI(P)edf} = 4.5 \left(\frac{E_{exp}}{10^5} \right)^{1/3}$ <p style="text-align: center;">(5.9)</p>	$i' = \frac{34.4}{E_{exp}^{1/3}} = 0.11 R' \quad (-1.03)$ <p style="text-align: center;">(5.10)</p>	$r_{ZI(i)} = \left(\frac{34.4}{0.11 E_{exp}^{1/3}} \right)^{(-1/1.03)} \left(\frac{E_{exp}}{10^5} \right)$ <p style="text-align: center;">(5.11)</p>	$E_{exp} = 3.1 \cdot 10^9 \text{ J}$

TABLA 5.5. Procedimiento de obtención de la E_{exp} (método Baker para recipientes esféricos) que proporciona la misma distancia de Intervención con edificios, tanto a partir del umbral de sobrepresión de 6000 Pa como del impulso de 110 Pa·s

Distancia de Intervención a partir del umbral de sobrepresión de 6000 Pa (ec. 5.41)	Igualando las ecuaciones 5.6 y 5.44	Con las ec. I.3 y 5.12 se obtiene la expresión analítica de la distancia obtenida a partir del umbral de impulso de 110 Pa·s	Igualando las distancias de las ec. 5.41 y 5.13
$r_{ZI(P)edf} = 0.093 E_{exp}^{1/3}$ <p style="text-align: center;">(5.41)</p>	$i' = \frac{17.4}{E_{exp}^{1/3}} = 0.055 R' \quad (-1.05)$ <p style="text-align: center;">(5.12)</p>	$r_{ZI(i)edf} = \left(\frac{17.4}{0.055 E_{exp}^{1/3}} \right)^{\left(\frac{-1}{1.05} \right)} \left(\frac{E_{exp}}{10^5} \right)^{\frac{1}{3}}$ <p style="text-align: center;">(5.13)</p>	$E_{exp} = 2.3 \cdot 10^9 \text{ J}$

TABLA 5.6. Criterios de elección del umbral que define cada Zona de Planificación

Método de cálculo	Zona de Planificación	Cálculo con el umbral de sobrepresión	Cálculo con el umbral de impulso	Cálculo con el umbral de 22500 Pa	
TNT equivalente	Zona de Intervención con edificios	$W_{TNT} \geq 440 \text{ kg}$	$30 \leq W_{TNT} < 440 \text{ kg}$	$W_{TNT} < 30 \text{ kg}$	
	Zona de Alerta	$W_{TNT} \geq 600 \text{ kg}$	$1.3 \leq W_{TNT} < 600 \text{ kg}$	$W_{TNT} < 1.3 \text{ kg}$	
Multienergía (curvas 6 a 10)	Zona de Intervención con edificios	$E_{exp} \geq 3.1 \cdot 10^9 \text{ J}$	$10^8 \leq E_{exp} < 3.1 \cdot 10^9 \text{ J}$	$E_{exp} < 10^8 \text{ J}$	
	Zona de Alerta	$E_{exp} \geq 7.6 \cdot 10^9 \text{ J}$	$4.9 \cdot 10^6 \leq E_{exp} < 7.6 \cdot 10^9 \text{ J}$	$E_{exp} < 4.9 \cdot 10^6 \text{ J}$	
Multienergía (curva 5)	Zona de Intervención con edificios	$E_{exp} \geq 5.5 \cdot 10^8 \text{ J}$	$1.1 \cdot 10^7 \leq E_{exp} < 5.5 \cdot 10^8 \text{ J}$	$E_{exp} < 1.1 \cdot 10^7 \text{ J}$	
	Zona de Alerta	$E_{exp} \geq 2.6 \cdot 10^9 \text{ J}$	$5.1 \cdot 10^5 \leq E_{exp} < 2.6 \cdot 10^9 \text{ J}$	$E_{exp} < 5.1 \cdot 10^5 \text{ J}$	
Multienergía (curva 4)	Zona de Intervención con edificios	$E_{exp} \geq 1.6 \cdot 10^8 \text{ J}$	$E_{exp} < 1.6 \cdot 10^8 \text{ J}$	-	
	Zona de Alerta	$E_{exp} \geq 7.3 \cdot 10^8 \text{ J}$	$E_{exp} < 7.3 \cdot 10^8 \text{ J}$	-	
Multienergía (curva 3)	Zona de Intervención con edificios	-	-	-	
	Zona de Alerta	$E_{exp} \geq 1.3 \cdot 10^8 \text{ J}$	$E_{exp} < 1.3 \cdot 10^8 \text{ J}$	-	
Baker	Esferas	Zona de Intervención con edificios	$E_{exp} \geq 2.3 \cdot 10^9 \text{ J}$	$8 \cdot 10^7 \leq E_{exp} < 2.3 \cdot 10^9 \text{ J}$	$E_{exp} < 8 \cdot 10^7 \text{ J}$
		Zona de Alerta	$E_{exp} \geq 5.6 \cdot 10^9 \text{ J}$	$3.8 \cdot 10^6 \leq E_{exp} < 5.6 \cdot 10^9 \text{ J}$	$E_{exp} < 3.8 \cdot 10^6 \text{ J}$
	Cilindros	Zona de Intervención con edificios	$E_{exp} \geq 5.8 \cdot 10^9 \text{ J}$	$2.1 \cdot 10^8 \leq E_{exp} < 5.8 \cdot 10^9 \text{ J}$	$E_{exp} < 2.1 \cdot 10^8 \text{ J}$
		Zona de Alerta	$E_{exp} \geq 1.3 \cdot 10^{10} \text{ J}$	$10^7 \leq E_{exp} < 1.3 \cdot 10^{10} \text{ J}$	$E_{exp} < 10^7 \text{ J}$

5.5. METODOLOGÍAS PARA DETERMINAR LAS ZONAS DE PLANIFICACIÓN

El procedimiento general de cálculo de las Zonas de Planificación es el siguiente:

Zonas de Alerta e Intervención con edificaciones próximas:

1. Se calcula la distancia (r_i) a la que se alcanza el umbral de impulso (110 Pa·s para Intervención y 40 Pa·s para Alerta) o la distancia (r_p) a la que se alcanza el umbral de sobrepresión (6000 Pa para Intervención y 1300 Pa para Alerta).
2. En el caso del estallido de recipientes, ha de tomarse como distancia de Intervención la mayor entre la calculada para la sobrepresión o impulso de la onda y la correspondiente al alcance de los fragmentos primarios.

Zona de Intervención sin edificaciones próximas:

1. En el caso de estallido de recipiente, el alcance máximo de los fragmentos primarios.
2. En el resto de las explosiones, la distancia a la que se alcanza el umbral de sobrepresión de 22500 Pa.

5.5.1. Procedimiento para el método del TNT equivalente

Como se comenta en el anexo I, el método del TNT equivalente se aplica a sustancias explosivas (explosivos clásicos) o sustancias químicas inestables que puedan explotar en determinadas condiciones (nitrate amónico, clorato potásico, etc).

El cálculo de las Zonas de Planificación utilizando este procedimiento es el siguiente:

1. Determinar la masa de TNT equivalente.
2. Elegir el umbral (sobrepresión o impulso) que determina cada distancia de planificación, a partir de la tabla 5.6.
3. Seguir la secuencia de la tabla 5.7.

TABLA 5.7. Cálculo de la distancias de las Zonas de Planificación cuando se utiliza el método del TNT equivalente

Zonas de Planificación	Presencia de edificios	Umbral seleccionado con la tabla 5.5.	Distancia escalada (z')	Distancia de la zona, ec. 3.5, r (m)
Intervención	Sí	Sobrepresión $P_s = 6000 \text{ Pa}$	Para $P_s = 6000 \text{ Pa}$ en figura 3.2 $z' = 20$	$r_{ZI(P)edf} = 20 W_{TNT}^{1/3}$ (5.14)
		Impulso: $i = 110 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ Escalado (ecuación 3.6): $i_{TNT} = \frac{110}{W_{TNT}^{1/3}}$ (5.15)	Con i_{TNT} determinar z' en la figura 3.3	$r_{ZI(i)edf} = z' W_{TNT}^{1/3}$ (5.16)
	No	Sobrepresión $P_s = 22500 \text{ Pa}$	Para $P_s = 22500 \text{ Pa}$ en figura 3.2 $z' = 7$	$r_{ZI \sin edf} = 7 W_{TNT}^{1/3}$ (5.17)
Alerta	Para todos los casos	Sobrepresión $P_s = 1300 \text{ Pa}$	Para $P_s = 1300 \text{ Pa}$ en figura 3.2 $z' = 70$	$r_{ZA(P)} = 70 W_{TNT}^{1/3}$ (5.18)
		Impulso: $i = 40 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ Escalado (ecuación 3.6): $i_{TNT} = \frac{40}{W_{TNT}^{1/3}}$ (5.19)	Con i_{TNT} determinar z' en la figura 3.3	$r_{ZA(i)} = z' W_{TNT}^{1/3}$ (5.20)

5.5.2. Procedimiento para el método Multienergía

El método Multienergía se utiliza para la explosión de nubes de vapores inflamables. Como se indica en el anexo I, los parámetros característicos de la onda de presión dependen principalmente del confinamiento y congestión de la zona en la que se encuentre la nube.

Cuando se desea calcular la distancia a la que se produce una sobrepresión o impulso determinados, como es el caso de las Zonas de Planificación, es necesario disponer de una relación directa entre la magnitud peligrosa y la distancia. El método Multienergía proporciona la relación entre la sobrepresión escalada y la distancia escalada (figura I.5) pero no define el “impulso escalado”, ni se establecen relaciones entre éste y la “distancia escalada”.

Para salvar este obstáculo, en esta Tesis se define y deduce un “impulso escalado” en función de la sobrepresión escalada y de la duración de la fase positiva escalada. Combinando las figuras I.5 y I.7 puede obtenerse una nueva correlación entre el impulso escalado y la distancia escalada.

En efecto, partiendo de las ecuaciones:

$$i = \frac{1}{2} P_s t_p \quad (2.2)$$

$$P' = \frac{P_s}{P_0} \quad (1.2)$$

$$t_p' = \frac{t_p c_0}{\left(\frac{E_{\text{exp}}}{P_0}\right)^{1/3}} \quad (1.12)$$

se obtiene:

$$i = \frac{1}{2} \frac{P_0^{2/3} E_{\text{exp}}^{1/3}}{c_0} P' t_p' \quad (5.21)$$

Si se define el nuevo parámetro “impulso escalado” como:

$$i' = P' \cdot t_p' \quad (5.22)$$

y se combina con 5.21 se obtiene:

$$i' = \frac{2 c_0}{P_0^{2/3} E_{\text{exp}}^{1/3}} i \quad (5.23)$$

estableciéndose así una relación entre el impulso y el impulso escalado donde interviene la presión atmosférica, la velocidad del sonido en el aire (que se consideran constantes) y la energía de la explosión (que varía en cada caso).

Las relaciones ‘impulso escalado vs distancia escalada’ se obtienen encontrando para cada valor de R' el producto $P' \cdot t_p'$ obtenidas de las figuras I.5 y I.7, representándose en la figura 5.6

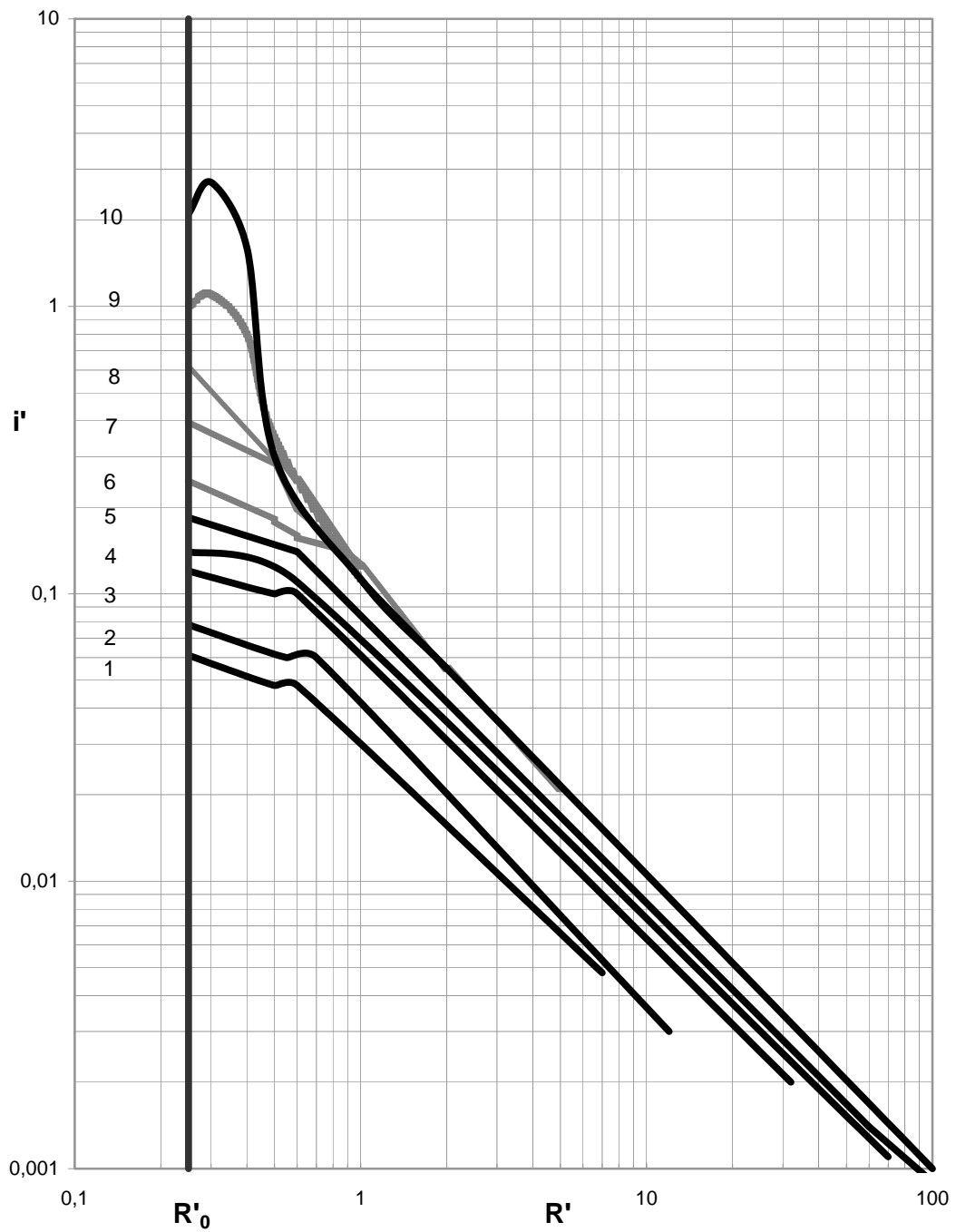


FIGURA 5.6. Impulso escalado frente a distancia escalada para el método Multienergía

Una vez establecida la relación entre el impulso y la distancia se emplea el siguiente procedimiento de cálculo de las Zonas de Planificación:

1. Calcular la energía de la explosión (E_{exp}) y seleccionar el nivel adecuado de la misma (N, de 1 a 10), tal y como se indica en el apartado I.3.
2. Elegir el umbral (sobrepresión o impulso) que determina cada distancia de planificación, a partir de la tabla 5.6.
3. Seguir la secuencia de la tabla 5.8.

TABLA 5.8. Cálculo de la distancias de las Zonas de Planificación cuando se utiliza el método de Multienergía

Zonas de Planificación	Presencia de edificios	Umbral seleccionado (tabla 5.5)	Distancia escalada (R')	Distancia de la zona, a partir de la ec. 5.31, r (m)
Intervención	Sí	Sobrepresión $P_s = 6000$ Pa Reducida: $P' = 0.06$	Para $P' = 0.06$ determinar R' en la figura 3.5	$r_{ZI(P)edf} = R' \left(\frac{E_{exp}}{10^5} \right)^{1/3}$ (5.24)
		Impulso: $i = 110$ Pa·s Escalado (a partir de la ecuación 5.23): $i' = \frac{34.4}{E_{exp}^{1/3}}$ (5.25)	Con i' y N determinar R' en la figura 3.10	$r_{ZI(i)edf} = R' \left(\frac{E_{exp}}{10^5} \right)^{1/3}$ (5.26)
	No	Sobrepresión $P_s = 22500$ Pa Reducida: $P' = 0.225$	Para $P' = 0.225$ determinar R' en la figura 3.5	$r_{ZI \sin edf} = R' \left(\frac{E_{exp}}{10^5} \right)^{1/3}$ (5.27)
Alerta	Para todos los casos	Sobrepresión $P_s = 1300$ Pa Reducida: $P' = 0.013$	Para $P' = 0.013$ determinar R' en la figura 3.5	$r_{ZA(P)} = R' \left(\frac{E_{exp}}{10^5} \right)^{1/3}$ (5.28)
		Impulso: $i = 40$ Pa·s Escalado (a partir de la ecuación 3.36): $i' = \frac{12.5}{E_{exp}^{1/3}}$ (5.29)	Con i' y N determinar R' en la figura 3.10	$r_{ZA(i)} = R' \left(\frac{E_{exp}}{10^5} \right)^{1/3}$ (5.30)

5.5.3. Procedimiento para el estallido de recipientes utilizando el método de Baker

El método de Baker se utiliza para determinar las magnitudes peligrosas de las ondas de presión procedentes del estallido de recipientes. Como se indica en el anexo I, este procedimiento emplea factores de corrección para recipientes cilíndricos o situados cerca del suelo. Dichos factores dependen de la distancia al recipiente, parámetro desconocido cuando se calculan Zonas de Planificación. Por tanto, es necesario obtener los factores de corrección que deben utilizarse en dicho proceso inverso. Dado que los umbrales escalados que definen las Zonas de Planificación son los valores ya corregidos de la sobrepresión e impulso escalados, para obtener el valor de R' correspondiente se debe realizar la corrección en sentido inverso, esto es, dividir el umbral escalado de sobrepresión o impulso por el factor adecuado. A continuación se describe el proceso de obtención de dichos factores de corrección inversa. La forma de operar es diferente, dependiendo de si se trata de un umbral de sobrepresión o de impulso.

Para los umbrales de sobrepresión:

En este caso el procedimiento es sencillo, puesto que los valores de R' que determinan las Zonas de Planificación se establecen en las tablas 5.11 y 5.12. Para dichos valores se determina el factor correspondiente de las tablas I.10 y I.11, indicándose los resultados obtenidos en las tablas 5.9 y 5.10.

Para los umbrales de impulso:

En este caso se debe operar de forma diferente, mediante un proceso iterativo. En primer lugar, se supone un valor de R' . A éste le corresponde, dependiendo del intervalo en el que se encuentre, el factor de corrección F indicado en las tablas 3.10 y 3.11. De la figura 3.15 se obtiene i' para el R' supuesto, y se corrige multiplicándolo por F para obtener i' *corregido*. A partir de la ecuación I.45:

$$i = \frac{i' P_0^{2/3} E_{\text{exp}}^{1/3}}{c_0} \quad (\text{I.45})$$

se obtiene E_{exp} , ya que los demás parámetros son conocidos ($i' = i'$ *corregido* e i es el umbral de impulso que corresponde a la Zona de Intervención o Alerta, 110 ó 40 Pa·s, respectivamente). Con E_{exp} y R' se calcula la distancia correspondiente, z , a partir de la ecuación I.3:

$$z = R' \left(\frac{E_{\text{exp}}}{P_0} \right)^{1/3} \quad (\text{5.31})$$

El valor de z indica si el factor de corrección F es o no válido. Dado que dicho factor disminuye al aumentar la distancia al origen de la explosión (ver tablas 3.10 y 3.11), si el valor de R' supuesto corresponde a una distancia muy pequeña, entonces F es suficientemente grande y, por tanto, conservador (se toma 30 m como mínima distancia de Planificación realista para los Planes de Emergencia Exteriores, al considerar que, en la mayoría de los casos, las distancias inferiores a ésta no superarían los límites del propio establecimiento). Si, por el contrario, el valor de z no fuese suficientemente pequeño, es necesario volver a iterar con un valor de R' menor para obtener un factor F más alto. El empleo del mayor factor de corrección F con sentido práctico asegura que el método sea conservador en todas las situaciones posibles.

En la figura 5.7 se muestra el diagrama correspondiente al proceso iterativo descrito anteriormente.

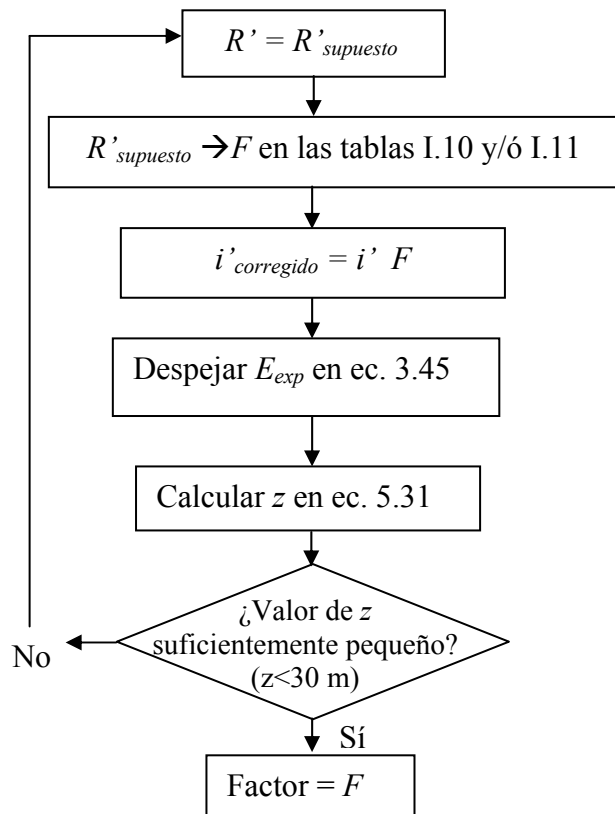


FIGURA 5.7. Diagrama del proceso iterativo propuesto para establecer los factores de corrección para los umbrales de impulso

A continuación se indica a modo de ejemplo los cálculos realizados para establecer el factor de corrección del impulso correspondiente a la Zona de Intervención con edificios para recipientes cilíndricos.

Ejemplo para recipientes cilíndricos. Zona de Intervención con edificios:

- Para el factor corrector del impulso:

Se supone $R' > 1.6$. De la figura 3.15 se obtiene $i' = 3 \cdot 10^{-2}$ que coincide con $i'_{\text{corregido}}$ al ser $F = 1$ en las tabla I.10 y I.11. Para el umbral de impulso establecido para esta Zona de Planificación (110 Pa·s) se tiene, a partir de la ecuación 5.44:

$$3 \cdot 10^{-2} = \frac{17.4}{E_{\text{exp}}^{1/3}} \quad (5.32)$$

de donde $E_{\text{exp}} = 1.9 \cdot 10^8 \text{ J}$.

A partir de la ecuación I.3 se tiene:

$$1.6 = z \left(\frac{10^5}{1.9 \cdot 10^8} \right)^{1/3} \quad (5.33)$$

siendo $z = 20 \text{ m}$, que es demasiado pequeña para constituir una Zona de Intervención. Así, el factor $F = 1$ corresponde a cualquier distancia igual o mayor que 20 m y es, por tanto, válido para la Zona de Intervención. De forma análoga se obtienen factores de corrección del impulso iguales a la unidad para todas las distancias de Planificación, tal como se indica en las tablas 5.9 y 5.10.

TABLA 5.9. Factores de corrección de los umbrales escalados de P' e i' para recipientes cercanos al suelo.

		P'	i'
Zona de Alerta		1.1	1
Zona de Intervención	Con edificios	1.1	1
	Sin edificios	1.1	-

TABLA 5.10. Factores de corrección de los umbrales escalados de P' e i' para recipientes cilíndricos.

		P'	i'
Zona de Alerta		1.4	1
Zona de Intervención	Con edificios	1.4	1
	Sin edificios	1.6	-

Una vez obtenidos los factores que se deben emplear en el cálculo de las Zonas de Planificación, se puede continuar el procedimiento. En este caso la distancia de Planificación es la mayor de las que resulte del valor límite de la sobrepresión o del impulso que corresponda y la del alcance de los fragmentos, por consiguiente el procedimiento a seguir necesita llevar a cabo ambas determinaciones. En la figura 5.8 se indican las diferentes posibilidades que pueden plantearse.

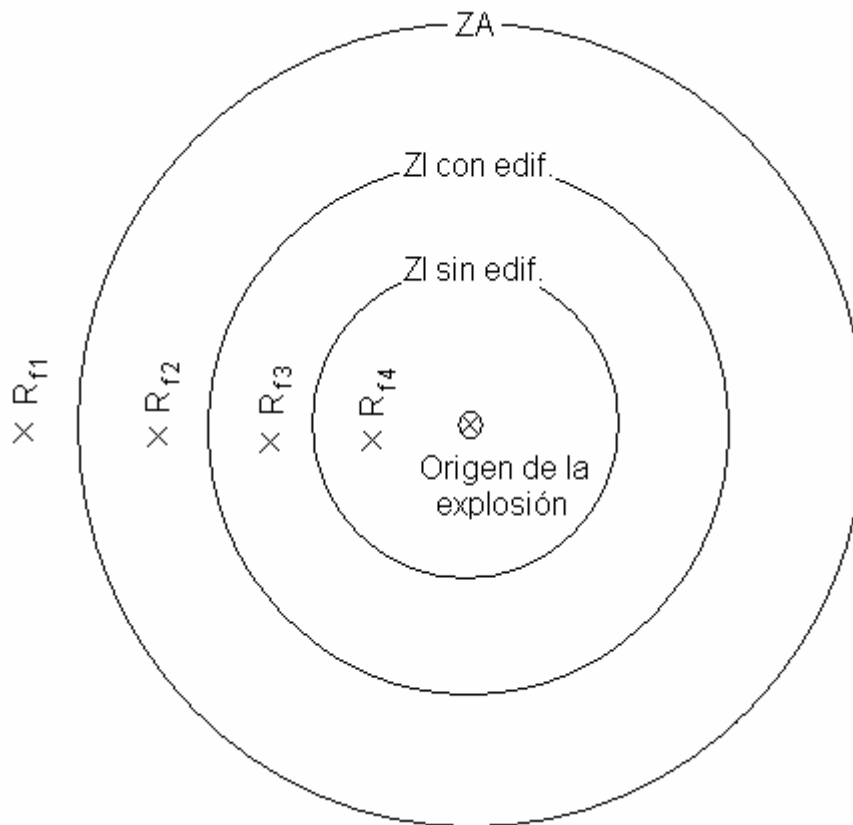


FIGURA 5.8. Posibilidades que pueden plantearse al comparar el alcance máximo de los fragmentos formados en la explosión de un contenedor (R_f) y las distancias de Intervención y Alerta calculadas a partir de los valores límite de sobrepresión o impulso

Con relación a la figura 5.8 se establece el procedimiento siguiente:

1. Determinar el alcance máximo de los fragmentos (R_f), siguiendo el método propuesto en el apartado I.4.2.
2. Seguir el diagrama de la figura 5.9.

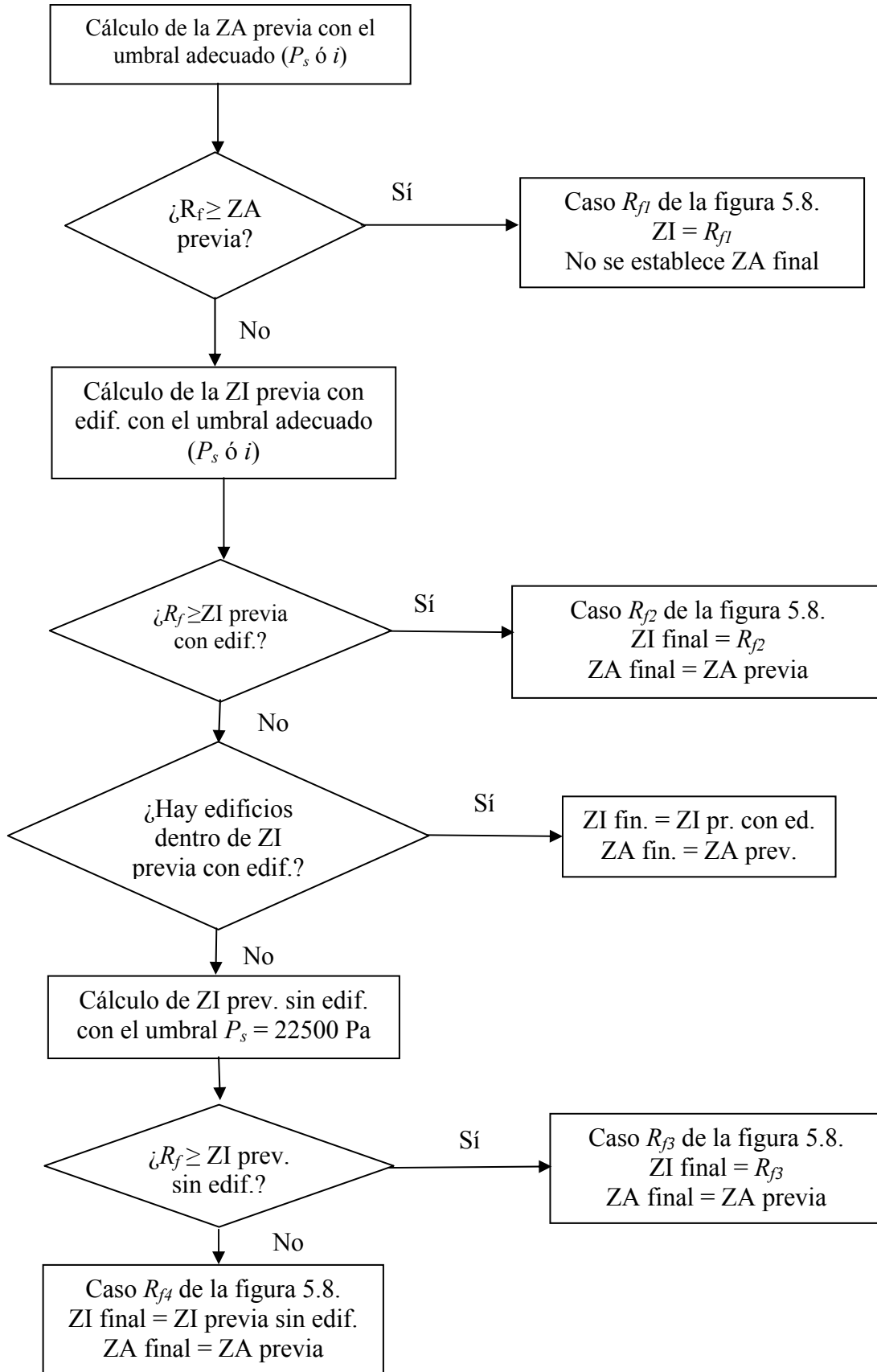


FIGURA 5.9. Diagrama del procedimiento de cálculo de las Zonas de Planificación para el estallido de recipientes

Así, el procedimiento de cálculo de las Zonas de Planificación para una explosión con el método de Baker es el siguiente:

1. Determinar la energía de la explosión (E_{exp}) -apartado I.4.1-.
2. Calcular el alcance máximo de los fragmentos (R_f) -apartado I.4.2-.
3. Seleccionar el umbral (sobrepresión o impulso) que determina cada distancia de planificación, a partir de la tabla 5.6.
4. Utilizar las tablas 5.11 y 5.12, para el cálculo de las Zonas de Alerta e Intervención, respectivamente.

TABLA 5.11. Cálculo de la distancia de Alerta cuando se utiliza el método de Baker para el estallido de recipientes

Umbral seleccionado (ver tabla 5.6)	Tipo de recipiente	Umbral modificado (ver tablas 5.9 y 5.10)	Distancia escalada (R')	Distancia de la zona, a partir de la ec. 5.31 (r, m)
Sobrepresión $P_s = 1300$ Pa Reducida: $P' = 0.013$	Esférico	$P'_{mod} = \frac{0.013}{1.1} = 0.012$ (5.34)	Con P'_{mod} en la figura I.14 $R' = 14$	$r_{ZA(P)} = \frac{14}{\left(\frac{P_0}{E_{exp}}\right)^{1/3}} = 0.3E_{exp}^{1/3}$ (5.35)
	Cilíndrico	$P'_{mod} = \frac{0.013}{1.1 \times 1.4} = 0.0084$ (5.36)	Con P'_{mod} en la figura I.14 $R' = 18$	$r_{ZA(P)} = \frac{18}{\left(\frac{P_0}{E_{exp}}\right)^{1/3}} = 0.4E_{exp}^{1/3}$ (5.37)
Impulso: $i = 40$ Pa·s Escalado (ec. 5.23): $i' = \frac{6.47}{E_{exp}^{1/3}}$ (5.38)	Esférico o cilíndrico	No se modifica	Con i' se obtiene R' en la figura I.15.	$r_{ZA(i)} = R' \left(\frac{E_{exp}}{10^5}\right)^{1/3}$ (5.39)

TABLA 5.12. Cálculo de la distancia de Intervención cuando se utiliza el método de Baker para el estallido de recipientes

Presencia de edificios	Umbral seleccionado (ver tabla 5.6)	Tipo de recipiente	Umbral modificado (ver tablas 5.9 y 5.10)	Distancia escalada (R')	Distancia de la zona, a partir de la ec. 5.31 (r , m)
Sí	Sobrepresión $P_s = 6000$ Pa Reducida: $P' = 0.060$	Esférico	$P'_{mod} = \frac{0.060}{1.1} = 0.054$ (5.40)	Con P'_{mod} en la figura I.14 $R' = 4.3$	$r_{ZI(P)edf} = \frac{3.5}{\left(\frac{P_0}{E_{exp}}\right)^{1/3}} = 0.075E_{exp}^{1/3}$ (5.41)
		Cilíndrico	$P'_{mod} = \frac{0.060}{1.1 \times 1.4} = 0.040$ (5.42)	Con P'_{mod} en la figura I.14 $R' = 5.0$	$r_{ZI(P)edf} = \frac{5.0}{\left(\frac{P_0}{E_{exp}}\right)^{1/3}} = 0.11E_{exp}^{1/3}$ (5.43)
	Impulso: $i = 110$ Pa·s Escalado (ec. 5.23): $i' = \frac{17.4}{E_{exp}^{1/3}}$ (5.44)	Esférico	No se modifica	Con i' se obtiene R' en la figura I.15.	$r_{ZI(i)edf} = R' \left(\frac{E_{exp}}{P_0}\right)^{1/3}$ (5.45)
		Cilíndrico	No se modifica	Con i' se obtiene R' en la figura I.15.	$r_{ZI(i)edf} = R' \left(\frac{E_{exp}}{P_0}\right)^{1/3}$ (5.46)
No	Sobrepresión $P_s = 22500$ Pa Reducida: $P' = 0.225$	Esférico	$P'_{mod} = \frac{0.225}{1.1} = 0.200$ (5.47)	Con P'_{mod} en la figura I.14 $R' = 1.5$	$r_{ZI(P)sin edf} = \frac{1.5}{\left(\frac{P_0}{E_{exp}}\right)^{1/3}} = 0.032E_{exp}^{1/3}$ (5.48)
		Cilíndrico	$P'_{mod} = \frac{0.225}{1.1 \times 1.6} = 0.130$ (5.49)	Con P'_{mod} en la figura I.14 $R' = 1.7$	$r_{ZI(P)sin edf} = \frac{1.7}{\left(\frac{P_0}{E_{exp}}\right)^{1/3}} = 0.036E_{exp}^{1/3}$ (5.50)

CAPÍTULO 6. LEGISLACIÓN COMPARADA EN MATERIA DE RIESGO QUÍMICO EN LOS PRINCIPALES PAÍSES DE LA UNIÓN EUROPEA

La Directiva 96/82/CE del Consejo, de 9 de diciembre de 1996 relativa al control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas (Seveso II) indica en su artículo 11 la necesidad por parte de los industriales de proporcionar la información necesaria a las autoridades competentes para elaborar planes de emergencia exterior, con objeto de minimizar los posibles daños a los seres humanos y elementos vulnerables más allá de los límites del establecimiento. Entre las medidas más importantes para coordinar la intervención en situaciones de emergencia se encuentra el establecimiento de Zonas de Planificación. En el presente capítulo se analiza la legislación que recoge los valores límite adoptados por los principales países de la Unión Europea (Francia, Reino Unido, Alemania e Italia) para establecer las Zonas de Planificación para explosiones accidentales en la industria. En cada caso se calculan los niveles de daños que pueden producirse en las zonas definidas por los valores límite indicados, lo que permite comparar la propuesta de este trabajo con lo establecido por países de nuestro entorno.

6.1. ZONAS DE PLANIFICACIÓN PARA ACCIDENTES GRAVES DE TIPO MECÁNICO EN LOS PRINCIPALES PAÍSES DE EUROPA

6.1.1. Francia

El Decreto de 29 de septiembre de 2005, relativo a la evaluación y toma en consideración de la probabilidad de ocurrencia, de la cinética, de la intensidad de los efectos y de la gravedad de las consecuencias de los accidentes potenciales en los estudios de daños de las instalaciones clasificadas sometidas a autorización (*Arrêté du 29 septembre 2005*) recoge la definición de las Zonas de Planificación y los valores límite adoptados para establecer cada una de ellas. En Francia, estas Zonas se denominan Zonas de peligro para la vida humana ("*Zones de dangers pour la vie humaine*"), distinguiendo las siguientes:

1. **Zona de peligro muy grave para la vida humana** ("*Zone de dangers très graves pour la vie humaine*"). Se define como aquella en la que se producen efectos letales significativos. El valor umbral adoptado para delimitarla es de 20000 Pa, que coincide con el valor de referencia adoptado en dicho Decreto para el efecto dominó.
2. **Zona de peligro grave para la vida humana** ("*Zone de dangers graves pour la vie humaine*"). Se define como aquella en la que se producen efectos letales. El valor umbral adoptado para delimitar esta zona es de 14000 Pa, que coincide con el valor de referencia adoptado para daños graves sobre las estructuras.

3. **Zona de peligro significativo para la vida humana** (“*Zone de dangers significatifs pour la vie humaine*”). Se define como aquella en la que se producen efectos irreversibles. El valor umbral adoptado para delimitar esta zona es de 5000 Pa, que coincide con el valor de referencia adoptado para daños ligeros sobre las estructuras.
4. **Zona de efectos indirectos por rotura de cristales sobre el ser humano** (“*Zone des effets indirects par bris de vitre sur l'homme*”). El valor umbral adoptado para delimitar esta zona es de 2000 Pa.

Aplicando la metodología PROBIT del capítulo 3 y, en concreto, las ecuaciones 3.2 y 3.19 a 3.21, pueden determinarse los porcentajes de daño correspondiente a cada una de las Zonas de Planificación indicadas, aunque teniendo en cuenta que sólo se consideran valores de sobrepresión y no de impulso, el análisis de las líneas de isorriesgo de daño estructural se realiza de acuerdo con el tramo vertical de las mismas, que sólo depende de la sobrepresión (figura 3.8).

1. En el límite de la *Zona de peligro muy grave para la vida humana* se produciría la rotura timpánica del 1% de la población expuesta, y los edificios sufrirían 13% de colapso, 48% de daño estructural mayor y 32% de daño estructural menor, mientras que el 7% de los edificios no sufriría daños apreciables.
2. En el límite de la *Zona de peligro grave para la vida humana* se produciría 5% de colapso, 26% de daño estructural mayor y 56% de daño estructural menor en los edificios expuestos, mientras que el 13% restante no sufriría daños apreciables.
3. En el límite de la *Zona de peligro significativo para la vida humana* el 53% de los edificios expuestos sufriría daño estructural menor.
4. En el límite de la *Zona de efectos indirectos por rotura de cristales sobre el ser humano* se produciría daño estructura menor en el 33% de los edificios.

En el artículo 515.16 del Código del Medio Ambiente (“code de l’environnement”) se indican las medidas que pueden tomarse por parte del Estado (prohibición de la construcción de nuevas viviendas o ampliación de las ya existentes, expropiación de terrenos o inmuebles, etc.) en el interior de dichas zonas, debido a la gravedad de las consecuencias en caso de accidente.

6.1.2. Reino Unido

En el Reino Unido, las Zonas de Planificación y los valores de referencia utilizados están definidos por HSE (*Health and Safety Executive, 1998*), de acuerdo con la Ley de Planificación de Sustancias Peligrosas de 1990 [*Planning (Hazardous Substances) Act, 1990*] y la Regulación sobre el Control de los Riesgos de los Accidentes Mayores de 1999 (*Control of Major Accident Hazards Regulations, 1999*), distinguiendo las siguientes Zonas:

- Aquélla en la que se produce la casi completa demolición de edificios y presenta una elevada probabilidad de muerte para sus ocupantes: 60000 Pa.
- Aquélla en la que se produce cierto daño estructural y puede haber afectados entre los ocupantes: 14000 Pa.
- Aquélla en la que no se produce daño estructural mayor, pero sí daños menores y rotura de ventanas: 7000 Pa.

Aplicando nuevamente la metodología PROBIT se determina el porcentaje de los daños correspondientes a cada una de las Zonas anteriores.

1. En el límite de la primera (60000 Pa) se produciría el 19% de rotura timpánica, el 75% de los edificios sufriría colapso y el 25% restante daño estructural mayor.
2. En el límite de la segunda (14000 Pa) se produciría el colapso del 5% de los edificios, mientras que el 26% sufriría daño estructural mayor, el 56% daño estructural menor y el 13% restante no sufriría daños apreciables.
3. En el límite de la tercera (7000 Pa) el 2% de los edificios sufriría daño estructural mayor, el 64% daño estructural menor y el 34% restante no sufriría daños apreciables.

6.1.3. Alemania

En Alemania no se han definido Zonas de Planificación. Los estudios técnicos que requieren el establecimiento de distancias de seguridad se realizan esencialmente atendiendo a cada caso en particular y utilizando como referencia valores límite publicados en la bibliografía especializada. No obstante, en la Segunda Orden de la Ley de Sustancias Explosivas (*2.SprengV, 2002*), modificada el 15 de Junio de 2002 por el artículo 3 de la Tercera Ley para la modificación de la Ley de Sustancias Explosivas y otros preceptos (*3.SprengÄndG, 2005*) se incluye información para el cálculo de distancias de seguridad en función del tipo y cantidad de explosivo almacenado. Conviene destacar que en este momento se encuentra en discusión una propuesta de establecimiento de Zonas de Planificación Territorial, presentada conjuntamente por la Comisión de Accidentes (*Störfall-Kommission -SFK-*) y por la Comisión Técnica para la Seguridad en las Plantas Industriales (*Technischer Ausschuss für Anlagensicherheit -TAA-*). En esta propuesta, denominada Guía de recomendaciones para distancias entre centros de trabajo -según la Orden de accidentes- y zonas con necesidad de protección -en el marco de la Planificación Territorial, transposición del artículo 50 de la Ley Federal de Inmisión (*SFK y TAA, 2005*), se incluyen valores límite de sobrepresión correspondientes a distintos tipos de daño. Finalmente se adopta un valor límite medio de 10000 Pa para Planificación Territorial. En dicha Guía se indica que este valor corresponde a la destrucción de paredes.

Si se analiza el valor de sobrepresión indicado mediante la metodología PROBIT, se encuentra que corresponde a un 1% de colapso, 10% de daño estructural mayor y 67% de daño estructural menor. El 22% restante no sufre daños apreciables.

6.1.4. Italia

Los valores límite y la definición de las Zonas de Planificación (denominadas Zonas de Riesgo) se encuentran recogidos en la Guía Básica de la Planificación de la Emergencia Exterior de los establecimientos industriales con riesgo relevante de accidente (*Linee Guida, 2004*) publicada por la Presidencia del Consejo de Ministros y el Departamento de Protección Civil. En ella se definen las Zonas de Riesgo (*Zone a rischio*), que son las siguientes:

- **De impacto seguro** (“*Prima zona di sicuro impatto*”). Se define como aquélla en la que se produce una elevada letalidad, inmediatamente adyacente al establecimiento. Caracterizada por efectos que conllevan una elevada letalidad para los seres humanos. El valor umbral adoptado para delimitar exteriormente esta zona es de 30000 Pa (60000 Pa para espacios abiertos).
- **De daño** (“*Seconda zona di danno*”). Es externa a la primera y en ella se pueden producir lesiones irreversibles para las personas que no tomen las debidas medidas de autoprotección y de posible daño letal para personas más vulnerables, como menores o ancianos. El valor umbral adoptado para delimitar esta zona es de 7000 Pa.
- **De atención** (“*Terza zona di attenzione*”). Caracterizada por la posibilidad de daño, generalmente no grave, aunque podría serlo en el caso de personas particularmente vulnerables. Para delimitar esta Zona se indica que debe efectuarse una evaluación específica que tenga en cuenta la complejidad territorial.

Aplicando nuevamente la metodología PROBIT se determina el porcentaje de los daños correspondientes a cada una de las Zonas anteriores.

1. En el límite de la primera (30000 Pa) se produciría el 2% de rotura timpánica, el 32% de los edificios sufriría colapso, el 56% daño estructural mayor, el 9% daño estructural menor y el 3% restante no sufriría daños apreciables. En el caso de espacios sin edificios (60000 Pa), se produciría un 19% de rotura timpánica, no siendo posible determinar el porcentaje de afectados por hemorragia pulmonar y por caída e impacto, al no proporcionar valores de impulso.
2. En el límite de la segunda (7000 Pa) el 2% de los edificios presentes sufriría daño estructural mayor, el 64% daño estructural menor y el 34% restante no sufriría daños apreciables. No se producirían daños personales directos (en exteriores de edificios).

6.2. COMPARACIÓN DE LOS VALORES LÍMITE Y ZONAS DE PLANIFICACIÓN DE LOS PRINCIPALES PAÍSES DE LA UE CON LA PROPUESTA DE ESTE TRABAJO

Una vez analizados los valores límite de cada país se puede establecer la comparación con la propuesta de este trabajo. Para ello, en la tabla 6.1 se indican los valores de sobrepresión (puesto que los de impulso no se han definido en los países estudiados) que se proponen en esta Tesis y se comparan con las Zonas de cada uno de los países anteriores (exceptuando Alemania, en el que no se han definido Zonas de Planificación).

TABLA 6.1. Comparación de las Zonas de Planificación de esta propuesta con las de los principales países de la UE

Propuesta	Francia	Reino Unido	Italia
-	-	Primera Zona (60000 Pa)	Primera Zona de impacto seguro para zonas sin edificios (60000 Pa)
-	-	-	Primera Zona de impacto seguro en el interior de edificios (30000 Pa)
Zona de Intervención sin edificios (22500 Pa)	Zona de peligro muy grave para la vida humana (20000 Pa)	-	-
-	Zona de peligro grave para la vida humana (14000 Pa)	Segunda Zona (14000 Pa)	-
Zona de intervención con edificios (6000 Pa)	-	Tercera Zona (7000 Pa)	Segunda Zona de daño (7000 Pa)
-	Zona de peligro significativo para la vida humana (5000 Pa)	-	-
Zona de Alerta (1300 Pa)	Zona de efectos indirectos por rotura de cristales sobre el ser humano (2000 Pa)	-	-
	-		

6.3. CONCLUSIONES

Como se observa, las Zonas de Planificación propuestas en este trabajo son similares a algunas de las utilizadas en Francia. En general, las propuestas en este documento son más conservadoras que las de Reino Unido e Italia, aunque la Zona de Intervención con edificios es similar a algunas de las utilizadas en dichos países. Conviene destacar que los países analizados no definen valores para limitar inferiormente la Zona de Alerta, excepto Francia, cuya Zona de efectos indirectos es similar a la definida en este documento. Por lo tanto, se estima que los valores límite propuestos en este trabajo son adecuados y proporcionan un elevado nivel de seguridad, al ser similares o más conservadores que los de los principales países de la Unión Europea.

Se observa que cada país ha adoptado valores límite diferentes para establecer las Zonas de Planificación. No obstante, se han realizado esfuerzos para coordinar la gestión de situaciones de emergencia provocadas por accidentes industriales. En este sentido, el Consejo de Europa ha elaborado un documento (Acuerdo EUR-OPA) en el que se establece una comparación de la gestión de riesgos mayores llevada a cabo por diferentes países (Bélgica, Francia, Rusia y Bulgaria). Este documento concluye con una serie de recomendaciones para el establecimiento de un modelo de gestión de emergencias común. En cualquier caso, no se analizan en dicho documento las Zonas de Planificación de la Emergencia Exterior ni se incluyen directrices para establecerlas. Estimamos que este trabajo puede aportar una base científica de partida para establecer valores límite y Zonas de Planificación comunes a todo el territorio europeo, dado que el artículo III.284 del *Tratado por el que se establece una Constitución para Europa (2004)* prevé la asunción por parte de la Unión Europea de ciertas competencias en materia de Protección Civil.

CAPÍTULO 7. PROGRAMA INFORMÁTICO

Con objeto de facilitar el proceso de cálculo de las magnitudes peligrosas y de las Zonas de Planificación expuestas en esta monografía, se ha elaborado un programa informático al que se ha denominado ZEUS (Zonas de planificación para Explosiones indUSTriales), que se aplica a explosiones industriales accidentales producidas por explosivos, sustancias inestables o pirotécnicas, nubes de vapor no confinadas y estallido de recipientes.

El CD adjunto contiene el programa citado y se incluye aquí el Manual de Usuario, donde se indican las funciones del programa y los resultados obtenidos. Los algoritmos utilizados son los estudiados en esta Tesis, y las Zonas de Planificación se calculan con la propuesta aquí presentada.

El programa ha sido elaborado utilizando el Compilador Borland C++ Builder. Antes de proceder a su instalación debe verificarse que el sistema cumple los requisitos mínimos necesarios, indicados en la introducción de este Manual.

Se ha traducido a otros tres idiomas (inglés, francés y alemán) para facilitar su difusión.

7.1. MANUAL DE USUARIO



Zonas de Planificación para **E**xplosiones ind **US**triales

PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE
CONSECUENCIAS Y ZONAS DE
PLANIFICACIÓN PARA ACCIDENTES
GRAVES DE TIPO MECÁNICO

MANUAL DE USUARIO



Requerimientos del Sistema

PC con 2500 MHz

512-MB RAM

100 MB de Disco Duro

CD-ROM

Windows[®] 98,2000,XP o Windows[®] NT

Ratón conectado al PC

Monitor VGA (capaz de permitir una resolución de 800×600)

Instalación de ZEUS[®]

En caso de que no funcione el autoarranque del CD, ejecutar el archivo Setup_ZEUS y seguir las instrucciones.

Asistencia Técnica

Grupo de Investigación de Seguridad e Higiene en la Industria. Universidad de Murcia.

Dpto. de Ingeniería Química. E-mail: ferdiaz@um.es; juanfsp@um.es.

Tlf: +34-968-36.39.36; +34-968-36.39.37; +34-968-36.73.64.

INTRODUCCIÓN

Este programa se aplica a explosiones industriales accidentales producidas por explosivos, sustancias inestables o pirotécnicas, nubes de vapor no confinadas y estallido de recipientes. Para cada una de ellas se informa sobre:

1. La sobrepresión e impulso a las distancias introducidas por el usuario. En el caso del estallido de recipientes se informa también del alcance máximo de los fragmentos.
2. Las Zonas de Planificación, definidas en la *Directriz Básica de Protección Civil para el control y planificación ante el riesgo de accidentes graves en los que intervienen sustancias peligrosas* –Real Decreto 1196/2003 de 19 de Septiembre- que son calculadas con la propuesta de este trabajo.
3. Los porcentajes de humanos y edificios afectados por diferentes tipos o niveles de daño a las distancias introducidas por el usuario.

MÓDULO 1 – PLANTEAMIENTOS GENERALES

Este capítulo explica cómo utilizar los elementos comunes a todas las pantallas de ZEUS[®]. La información específica para cada explosión se incluye en los módulos 2 a 4 de este Manual.



FIGURA 7.1. Pantalla de inicio de ZEUS[®]

Esta pantalla permite seleccionar el método de cálculo, cada uno correspondiente a un tipo de explosión, mostrando una pantalla de trabajo similar a la siguiente:

FIGURA 7.2. Pantalla de trabajo (En este caso se trata de la que corresponde a la explosión de una nube de vapor -método Multienergía-)

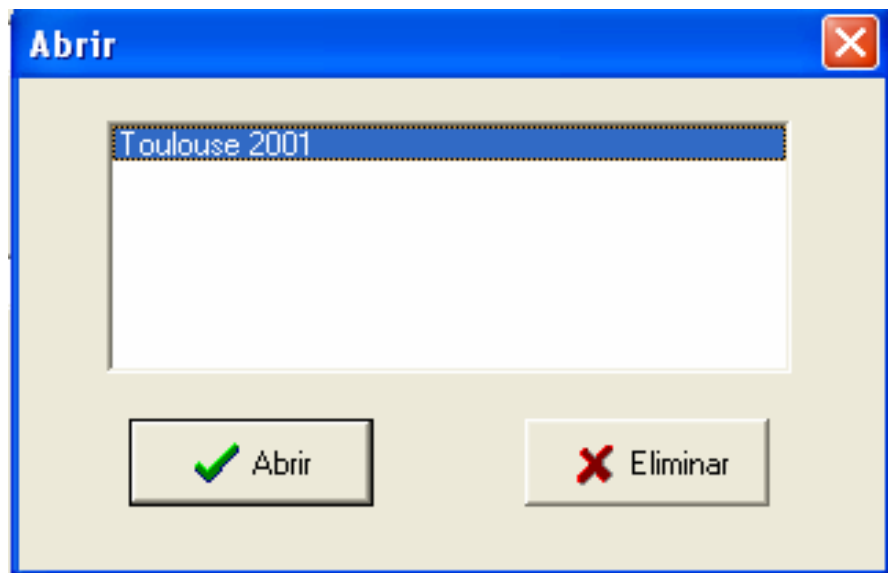
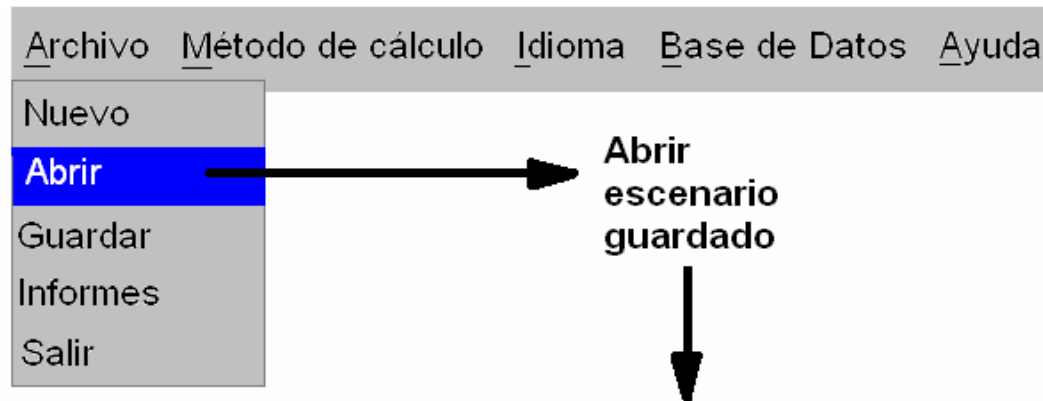
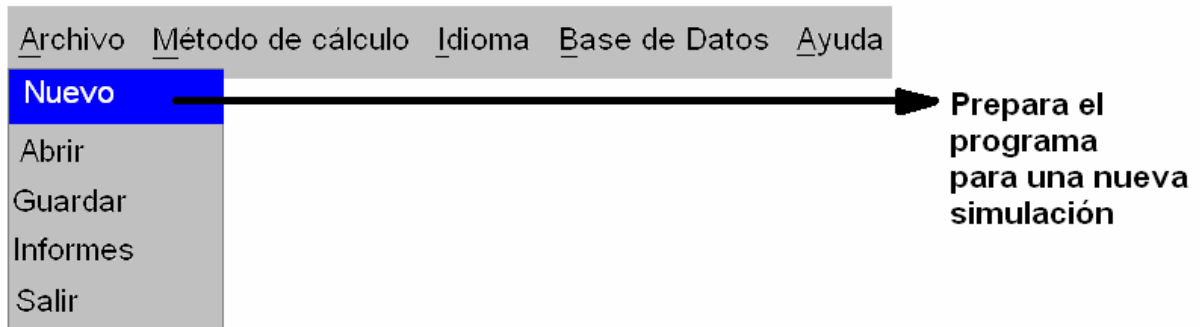
La pantalla de trabajo es diferente para cada explosión, pero todas tienen los elementos comunes siguientes:

- Barra de herramientas
- Datos de entrada
- Botón Calcular

La **barra de herramientas** permite abrir los siguientes elementos:

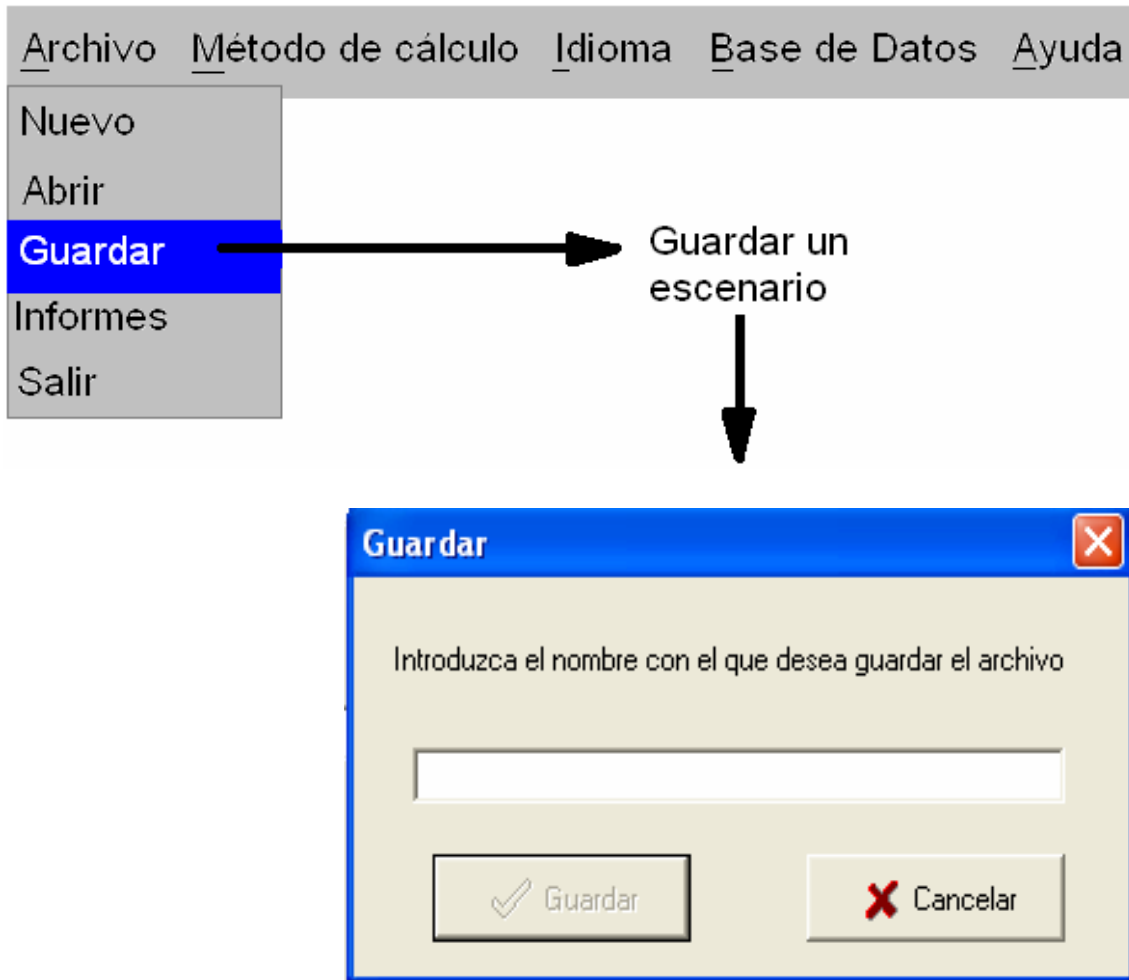
Archivo Método de cálculo Idioma Base de Datos Ayuda

A continuación se indica la función de cada una de las opciones de la barra de herramientas:



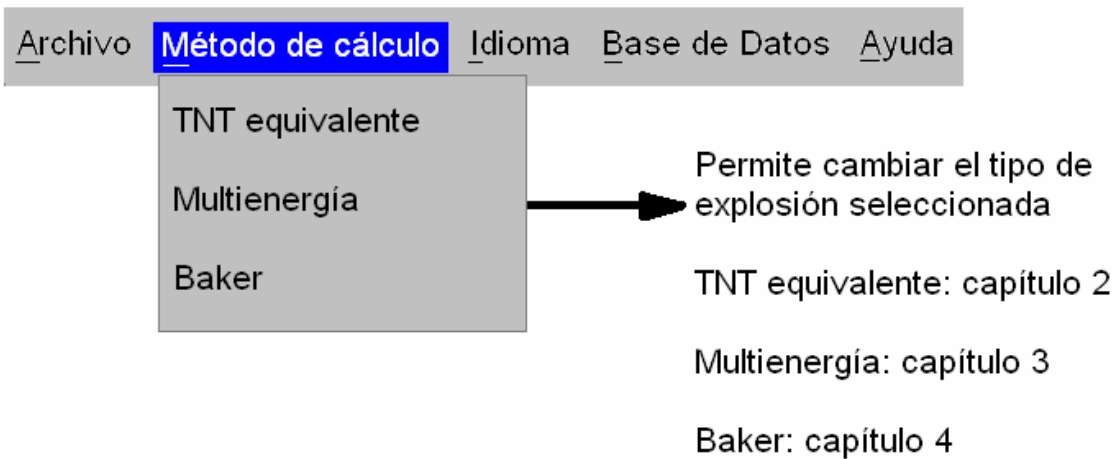
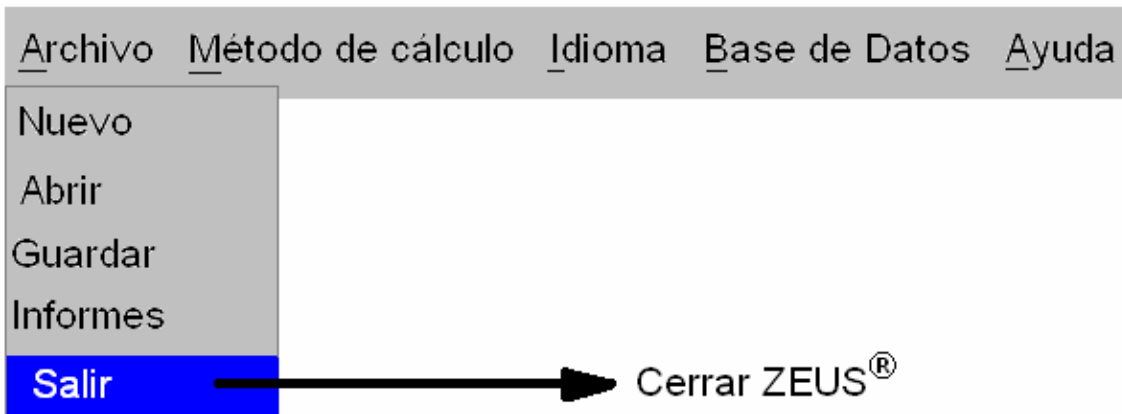
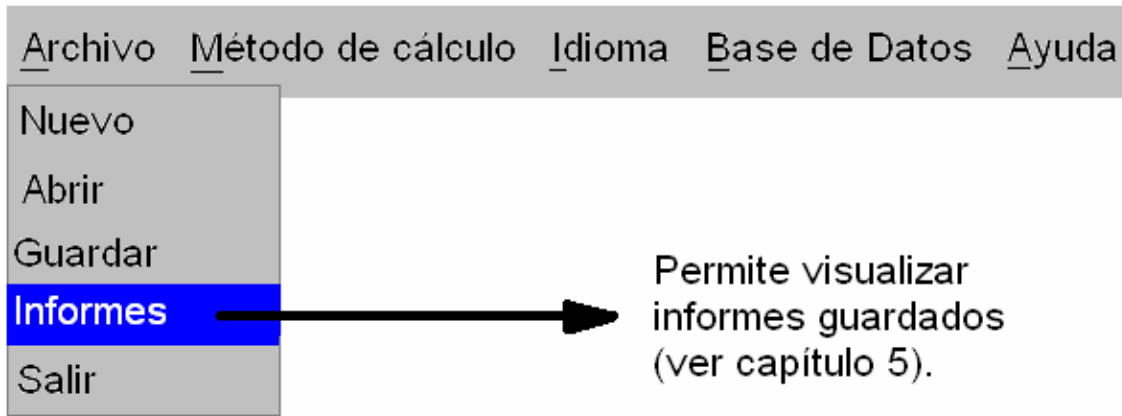
Opciones:

- *Abrir* – Abre el caso seleccionado
- *Eliminar* – Elimina el caso seleccionado



Opciones:

- *Guardar* – Guarda el caso seleccionado
- *Cancelar* – No guarda el caso seleccionado



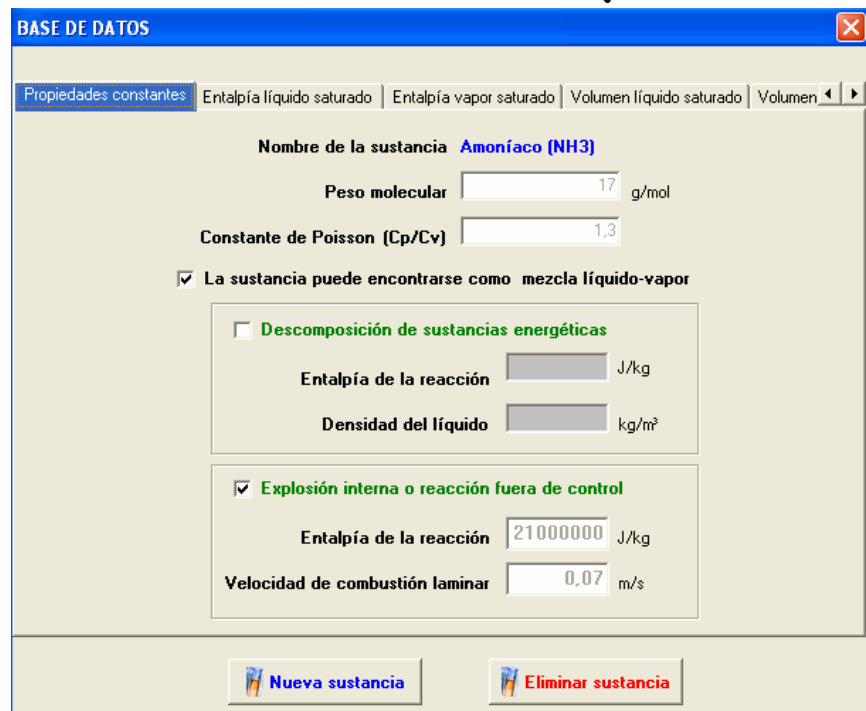
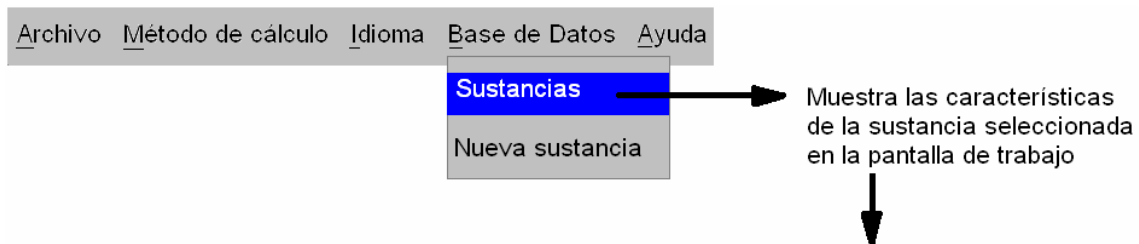
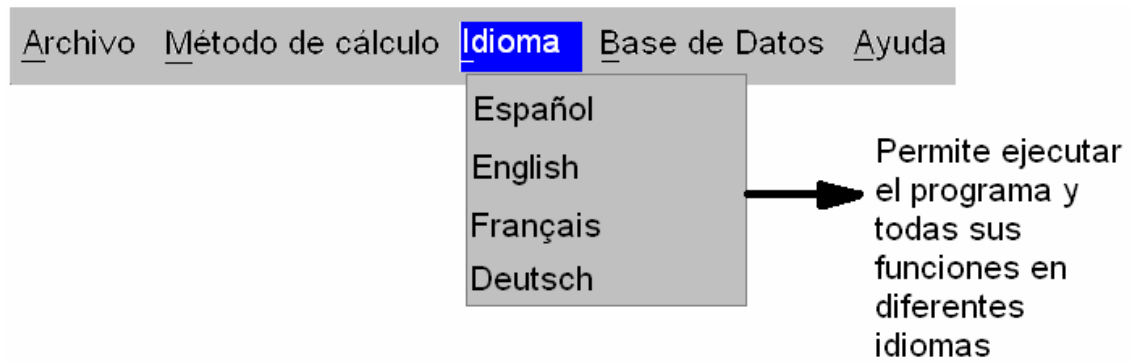


FIGURA 7.3. Pantalla de base de datos de sustancias (En este caso corresponde a la pestaña Propiedades constantes del método de Baker)

Opciones:

- Nueva sustancia – Permite introducir una nueva sustancia
- Eliminar sustancia – Permite eliminar la sustancia seleccionada

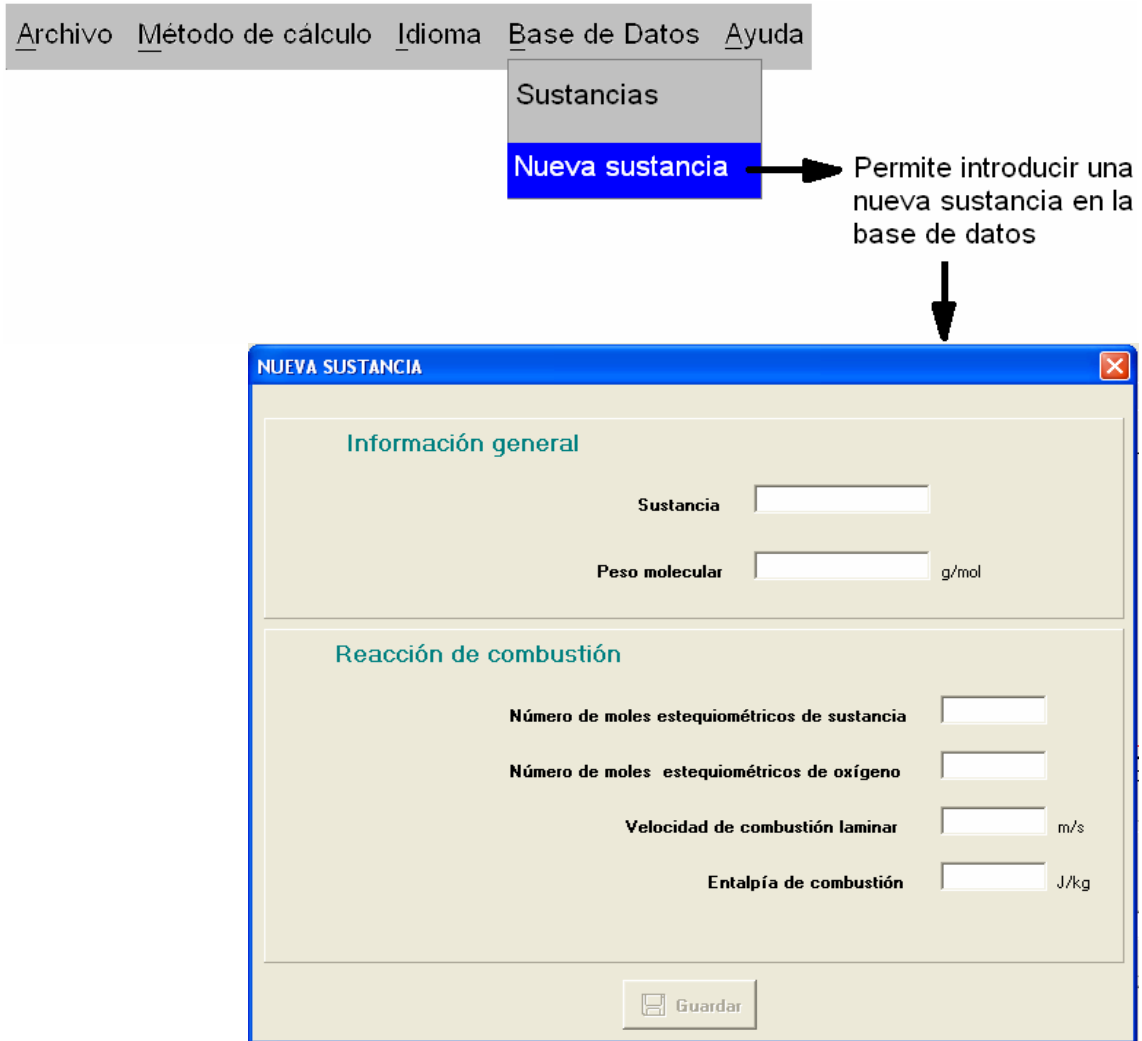


FIGURA 7.4. Pantalla para introducir en la base de datos las propiedades de una nueva sustancia (en este caso corresponde al método Multienergía)

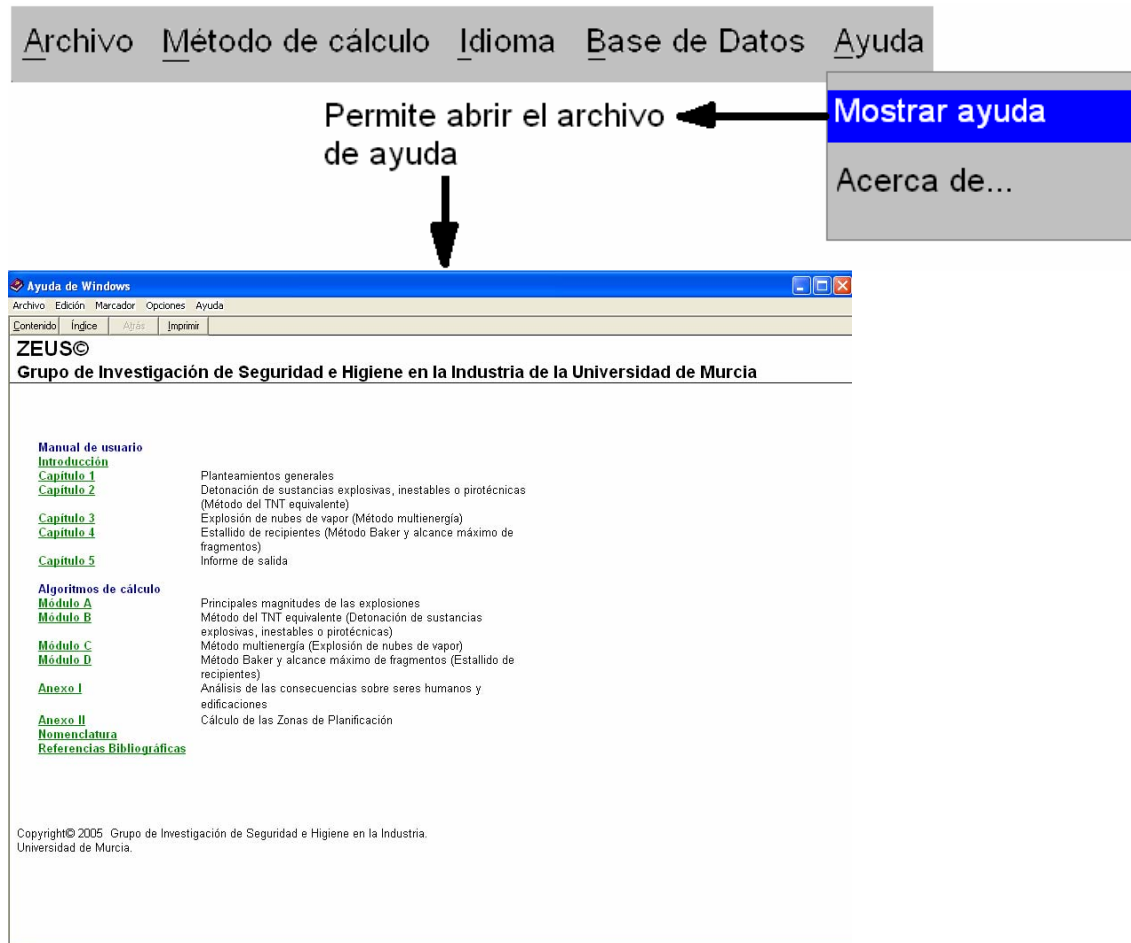


FIGURA 7.5. Pantalla de Ayuda



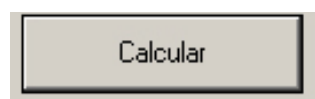
FIGURA 7.6. Pantalla de contacto con el Grupo de Investigación de Seguridad e Higiene en la Industria de la Universidad de Murcia.

Los **datos de entrada** (ver figura 7.2) tiene los siguientes elementos:

- Los *datos de la sustancia y de almacenamiento o ambientales* (que difieren para cada tipo de explosión).
- La selección de la variable (distancia, sobrepresión o impulso) y de sus límites inferior y superior para la tabla de datos que se ofrece en el informe de salida.
- Las *distancias* a las que se desea conocer los *efectos de la explosión* (se pueden introducir hasta tres distancias).

Botón Calcular

Una vez cumplimentados todos los campos, permite calcular el escenario.



MÓDULO 2 – DETONACIÓN DE SUSTANCIAS EXPLOSIVAS, INESTABLES O PIROTÉCNICAS (MÉTODO DEL TNT EQUIVALENTE)

Este modelo permite obtener:

- La sobrepresión y el impulso provocados por la detonación de materiales explosivos, inestables o pirotécnicos a las distancias introducidas.
- Las representaciones gráficas sobrepresión-distancia e impulso-distancia.
- Una tabla de datos numéricos distancia-sobrepresión-impulso
- Los porcentajes de humanos y edificios afectados a las distancias introducidas.
- Las Zonas de Planificación.

DATOS DE ENTRADA

The screenshot shows the 'TNT EQUIVALENTE' software interface. The window title is 'TNT EQUIVALENTE' and the menu bar includes 'Archivo', 'Método de cálculo', 'Idioma', 'Base de Datos', and 'Ayuda'. The main area is titled 'Datos de entrada' and is divided into three sections:

- Datos de la sustancia:** Contains a 'Nueva sustancia' button, a 'Sustancia' dropdown menu, and a 'Cantidad' input field with a 'kg' unit selector.
- Distancias a las que desea conocer los efectos:** Contains three input fields labeled 'Distancia 1', 'Distancia 2', and 'Distancia 3', each followed by a 'm' unit indicator.
- Distancia-Sobrepresión-Impulso:** Contains a 'Seleccione variable' dropdown menu, a help icon (?), and two input fields labeled 'Valor mínimo' and 'Valor máximo'.

A 'Calcular' button is located at the bottom center of the main area. The footer contains the text: 'Universidad de Murcia', 'Grupo de Investigación en Seguridad e Higiene en la Industria', and 'Copyright 2006'.

FIGURA 7.7. Pantalla de datos de entrada para el método del TNT equivalente

La pantalla de *datos de entrada para el método del TNT equivalente* está dividida en tres zonas:

- Datos de la sustancia
- Distancias a las que se desea conocer los efectos
- Distancia-Sobrepresión-Impulso

Datos de la sustancia

En esta zona se introducen las características siguientes:

- **Sustancia** – Al pulsar se despliega la base de datos y se selecciona la adecuada.
- **Cantidad** – La masa de la sustancia que participa en la explosión. Puede ser introducida en kg o en Tm, a elección del usuario, haciendo clic con el botón derecho del ratón sobre la etiqueta “kg” ó el símbolo triangular, a la derecha del cuadro de edición donde se introduce la masa.

Los datos numéricos aceptan la forma exponencial, ejemplo: 3000=3E3. El punto o la coma indican un número con cifras decimales.

Distancias a las que se desean conocer los efectos

El usuario puede introducir una, dos o las tres distancias.

Distancia-Sobrepresión-Impulso

El usuario puede indicar qué variable (distancia, sobrepresión o impulso) desea que se tome como referencia y entre qué límites. Los resultados numéricos distancia-sobrepresión-impulso estarán comprendidos entre los límites introducidos.

Introducción de una nueva sustancia en la base de datos

Si la sustancia deseada no se encuentra en el menú desplegable, se puede pulsar el botón “Nueva sustancia” para introducir una nueva sustancia en la base de datos, mostrándose la siguiente pantalla:

NUEVA SUSTANCIA

Sustancia

Equivalencia másica con el TNT kg TNT / kg sustancia

Introducir equivalencias diferentes para el cálculo de la sobrepresión y del impulso

Equivalencia másica con el TNT (sobrepresión) kg TNT / kg sustancia

Equivalencia másica con el TNT (impulso) kg TNT / kg sustancia

Guardar

FIGURA 7.8. Pantalla de introducción de una nueva sustancia para el método del TNT equivalente

Para introducir una nueva sustancia basta con indicar el nombre de la misma y la equivalencia másica con el TNT (kg TNT / kg sustancia). Al hacerlo se habilita el botón “Guardar” que incluye la nueva sustancia en la base de datos. Para ciertas aplicaciones se utilizan equivalencias diferentes para el cálculo de la sobrepresión y del impulso. El programa permite introducirlos habilitando la opción “Introducir equivalencias diferentes para el cálculo de la sobrepresión y del impulso”. Una vez introducidas ambas se habilita el botón “Guardar” y se puede añadir la nueva sustancia a la base de datos.

GRÁFICAS Y ZONAS DE PLANIFICACIÓN

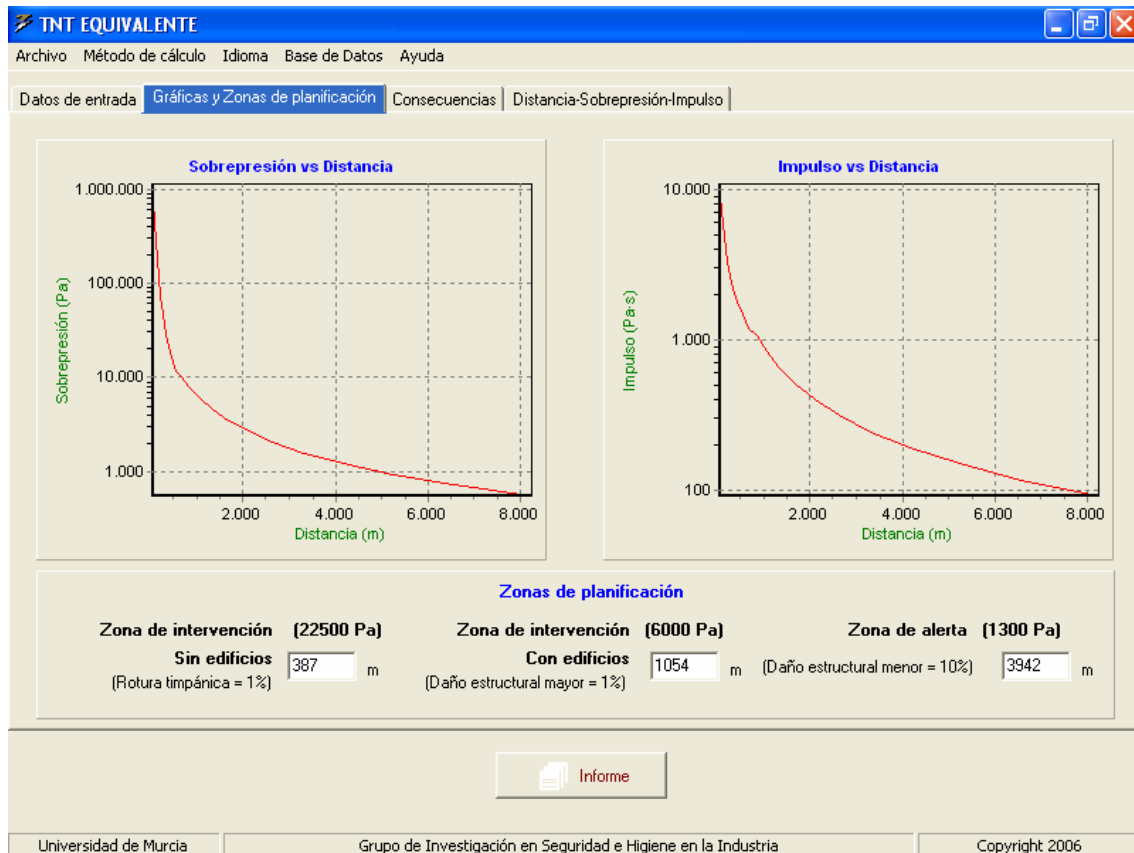


FIGURA 7.9. Pantalla de gráficas y Zonas de Planificación

La pantalla esta dividida en dos zonas:

- Gráficas
- Zonas de Planificación

Gráficas

Son las representaciones gráficas de la sobrepresión e impulso frente a la distancia al origen de la explosión. Disponen de un zoom dinámico que permite ampliar o reducir la zona de la gráfica que se desea visualizar con mayor precisión. Para ampliar la zona se remarca la misma presionando el botón izquierdo del ratón –figura 7.10-. Para volver al estado original se remarca una zona de la gráfica y se sobrepasan los ejes –figura 7.11-.

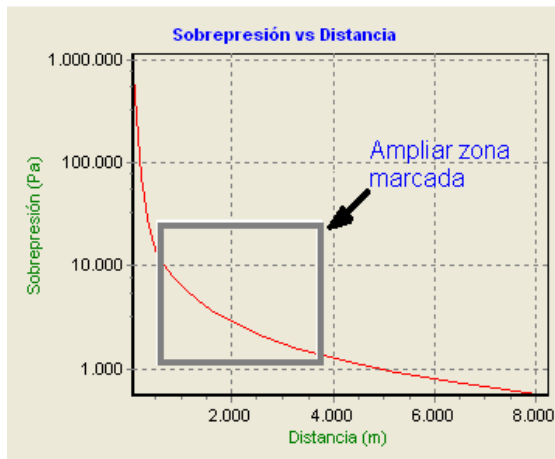


FIGURA 7.10. Ampliar zona

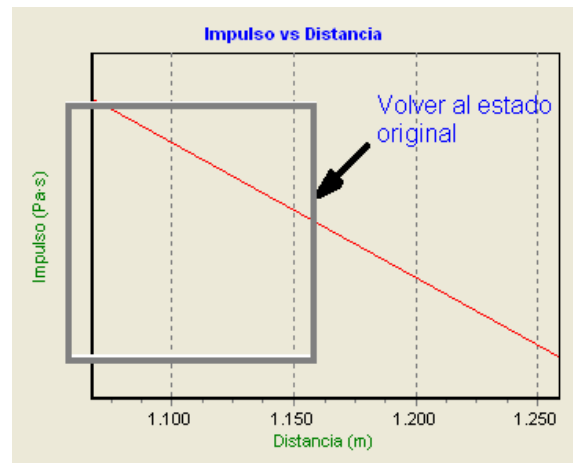


FIGURA 7.11. Volver al estado original

Zonas de Planificación

La información suministrada es la siguiente:

- **Zona de intervención sin edificios**– Cuando en el escenario accidental no hay edificaciones, la distancia de intervención corresponde a aquella en la que el 1% de la población expuesta sufriría rotura timpánica.
- **Zona de intervención con edificios**– Cuando en el escenario accidental hay edificaciones, la distancia de intervención corresponde a aquella en la que el 1% de los edificios expuestos sufriría daño estructural mayor.
- **Zona de alerta** – Es la distancia a la que se produce el 10% de daño estructural menor en edificios.

CONSECUENCIAS

Distancia al origen: 50 m	Distancia al origen: 3500 m	Distancia al origen: 4000 m
Sobrepresión: 611401 Pa	Sobrepresión: 934 Pa	Sobrepresión: 800 Pa
Impulso: 5548 Pa·s	Impulso: 100 Pa·s	Impulso: 86 Pa·s
Rotura timpánica: 100 %	Rotura timpánica: 0 %	Rotura timpánica: 0 %
Muerte impacto cráneo: 100 %	Muerte impacto cráneo: 0 %	Muerte impacto cráneo: 0 %
Muerte impacto cuerpo: 98 %	Muerte impacto cuerpo: 0 %	Muerte impacto cuerpo: 0 %
Hemorragia pulmonar: 100 %	Hemorragia pulmonar: 0 %	Hemorragia pulmonar: 0 %
Edificios no dañados: 0 %	Edificios no dañados: 95 %	Edificios no dañados: 96 %
Daño estructural menor: 0 %	Daño estructural menor: 5 %	Daño estructural menor: 4 %
Daño estructural mayor: 0 %	Daño estructural mayor: 0 %	Daño estructural mayor: 0 %
Colapso de edificios: 100 %	Colapso de edificios: 0 %	Colapso de edificios: 0 %

FIGURA 7.12. Pantalla de consecuencias de la detonación de sustancias inestables, explosivas o pirotécnicas

Indica las magnitudes peligrosas y efectos de la explosión a las distancias introducidas. Tiene dos zonas:

- **Sobrepresión e impulso**
- **Porcentajes de afectados**

Sobrepresión e impulso

- **Sobrepresión** – Es la sobrepresión estática de la onda (Pa) a las distancias introducidas en la pantalla de Datos de entrada.
- **Impulso** – Es el que se produciría a las distancias anteriores (Pa·s).

Porcentajes de afectados

Para cada una de las distancias introducidas en la pantalla de Datos de entrada se indican los porcentajes de individuos que probablemente:

- Sufrirían **rotura timpánica**
- Morirían por **hemorragia pulmonar**

- Morirían por **caída e impacto con el cuerpo**
- Morirían por **caída e impacto con el cráneo**

También se indican los porcentajes de edificios que probablemente:

- No sufrirían **ningún daño**
- Sufrirían **daño estructural menor**
- Sufrirían **daño estructural mayor**
- Sufrirían **colapso total o parcial**

DISTANCIA-SOBREPRESIÓN-IMPULSO

Muestra una tabla de resultados numéricos entre los límites fijados por el usuario en la Pantalla de Datos de Entrada.

The screenshot shows the 'TNT EQUIVALENTE' software interface. The main window displays two tables of numerical results under the 'Distancia-Sobrepresión-Impulso' tab. The left table lists results for distances from 410m to 545m, and the right table lists results for distances from 639m to 2718m. Each table has three columns: Distancia (m), Sobrepresión (Pa), and Impulso (Pa·s). Below the tables is an 'Informe' button. The footer contains the text: 'Universidad de Murcia', 'Grupo de Investigación en Seguridad e Higiene en la Industria', and 'Copyright 2006'.

Distancia (m)	Sobrepresión (Pa)	Impulso (Pa·s)
410	20000	1855
416	19419	1831
423	18839	1807
429	18258	1782
436	17677	1757
443	17097	1732
451	16516	1706
459	15935	1679
468	15355	1652
477	14774	1624
486	14194	1596
497	13613	1567
508	13032	1537
519	12452	1507
532	11871	1476
545	11290	1444

Distancia (m)	Sobrepresión (Pa)	Impulso (Pa·s)
639	10710	1255
671	10129	1203
706	9548	1150
745	8968	1096
789	8387	1042
840	7806	1076
897	7226	1002
965	6645	927
1044	6065	851
1139	5484	775
1254	4903	698
1398	4323	621
1583	3742	543
1831	3161	464
2182	2581	384
2718	2000	303

FIGURA 7.13. Pantalla de tabla de resultados numéricos distancia-sobrepresión-impulso para la detonación de sustancias inestables, explosivas o pirotécnicas

MÓDULO 3 – EXPLOSIÓN DE NUBES DE VAPOR (MÉTODO MULTIENERGÍA)

Este modelo permite obtener:

- La sobrepresión y el impulso provocados por la explosión de nubes de vapor.
- Las representaciones gráficas sobrepresión-distancia e impulso-distancia.
- Una tabla de datos numéricos distancia-sobrepresión-impulso
- Los porcentajes de humanos y edificios afectados a las distancias introducidas.
- Las Zonas de Planificación.

DATOS DE ENTRADA

The screenshot displays the 'MULTIENERGIA' software interface for inputting data for a vapor cloud explosion analysis. The window title is 'MULTIENERGIA' and the menu bar includes 'Archivo', 'Método de cálculo', 'Idioma', 'Base de Datos', and 'Ayuda'. The main area is titled 'Datos de entrada' and is organized into several sections:

- Datos sustancia y temperatura ambiental:** Includes a 'Nueva sustancia' button, a 'Sustancia' dropdown menu, a 'Masa de sustancia en la nube' input field (kg), and a 'Temperatura ambiental' input field (K).
- Datos energéticos y geométricos:** Includes a '% de nube obstruida' input field (%), a 'Nivel de la explosión' dropdown menu, a 'Fuente de ignición' dropdown menu, a 'Tipo de confinamiento' dropdown menu, a 'Volumen total de obstáculos' input field (m³), and an 'Área superficial de obstáculos' input field (m²).
- Selección del nivel de la explosión:** Features two radio buttons: 'Selección manual' and 'Cálculo automático'.
- Distancia-Sobrepresión-Impulso:** Includes a 'Seleccione variable' dropdown menu, a 'Valor mínimo' input field, and a 'Valor máximo' input field.
- Distancias a las que desea conocer los efectos:** Contains three input fields for 'Distancia 1', 'Distancia 2', and 'Distancia 3', each followed by a unit 'm'.

A 'Calcular' button is positioned at the bottom center of the interface. The footer of the window contains the text: 'Universidad de Murcia', 'Grupo de Investigación en Seguridad e Higiene en la Industria', and 'Copyright 2006'.

FIGURA 7.14. Pantalla de datos de entrada para el método Multienergía (explosión de nubes de vapor)

La pantalla de *datos de entrada* está dividida en cinco zonas:

- Datos de la sustancia y temperatura ambiente
- Selección del nivel de explosión
- Datos energéticos y geométricos
- Distancia-Sobrepresión-Impulso
- Distancias a las que se desea conocer los efectos

Datos de la sustancia y temperatura ambiente

En esta zona se introducen las características siguientes:

- **Sustancia** – Al pulsar se despliega la base de datos y se selecciona la adecuada.
- **Masa de sustancia en la nube** – Se refiere a la masa de combustible en la nube que se encuentra entre los límites de explosividad. Puede ser introducida en kg o en Tm, a elección del usuario, haciendo clic con el botón derecho del ratón sobre la etiqueta “kg” ó el símbolo triangular, a la derecha del cuadro de edición donde se introduce la masa.
- **Temperatura ambiental** - Es la temperatura atmosférica. Puede ser introducida en °C o en K, a elección del usuario, haciendo clic con el botón derecho del ratón sobre la etiqueta “K” ó el símbolo triangular, a la derecha del cuadro de edición donde se introduce la temperatura.

Los datos numéricos aceptan la forma exponencial, ejemplo: 3000=3E3. El punto o la coma indican un número con cifras decimales.

Selección del nivel de la explosión

El programa permite la selección del nivel por el propio usuario (selección manual) o que lo calcule el programa utilizando la metodología GAME (cálculo automático). Dependiendo de la selección se habilitan las opciones correspondientes del panel “Datos energéticos y geométricos”.

Datos energéticos y geométricos

Sea cual sea la elección (manual o cálculo automático), siempre se debe introducir el **porcentaje de la nube en zona obstruida**, esto es, la situada en regiones con elevada densidad de objetos, equipos, instalaciones, etc.

Cuando el usuario ha optado por la selección manual, el menú desplegable “Nivel de la explosión” permite seleccionarlo entre los niveles 3 -nube en campo libre, sin obstáculos- a 10 -nube muy obstruida y/o sustancia muy reactiva y/o fuente de ignición de elevada energía-, de acuerdo con la recomendación de TNO. Si, por el contrario, se selecciona “Cálculo automático”, se deben introducir las características geométricas de la instalación que se indican y la

energía de la fuente de ignición, información que se utiliza en el cálculo del nivel de la explosión del método Multienergía:

- **Fuente de ignición** - Puede ser de alta energía (una explosión interna, un dardo de fuego...) o de baja energía (una chispa, una superficie caliente...). En el caso de seleccionar una fuente de alta energía se deshabilitan las opciones correspondientes al tipo de confinamiento, al volumen total de obstáculos y al área superficial de obstáculos, dado que el método propone seleccionar automáticamente el nivel 10.
- **Tipo de confinamiento** - Indica las posibilidades de expansión de la onda de presión, que puede producirse en 3 dimensiones, esto es, en ausencia de confinamiento, o bien en 2 dimensiones si la nube se encuentra confinada entre planos paralelos (suelo y techo, por ejemplo).
- **Volumen total de obstáculos** - Es el volumen de objetos (equipos, estructuras,...) sumergidos en la nube.
- **Área total de obstáculos** - Es la superficie de los objetos (equipos, estructuras,...) sumergidos en la nube.

Distancia-Sobrepresión-Impulso

El usuario puede indicar qué variable (distancia, sobrepresión o impulso) desea que se tome como referencia y entre qué límites. Los resultados numéricos distancia-sobrepresión-impulso estarán comprendidos entre los límites introducidos.

Distancias a las que se desean conocer los efectos

El usuario puede introducir una, dos o las tres distancias.

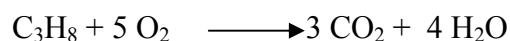
Introducción de una nueva sustancia en la base de datos

Si la sustancia deseada no se encuentra en el menú desplegable, se puede pulsar el botón “Nueva sustancia” para introducir una nueva sustancia en la base de datos, mostrándose la siguiente pantalla:

FIGURA 7.15. Pantalla de introducción de una nueva sustancia para el método Multienergía

Para añadir una nueva sustancia a la base de datos, se debe introducir:

- El nombre de la sustancia.
- La masa molecular.
- El número de moles estequiométricos de sustancia y de oxígeno que intervienen en la reacción de combustión. Únicamente es relevante la relación entre ambos coeficiente, por lo que no es necesario ajustar la reacción para un mol de sustancia. Para el propano, por ejemplo, dichos coeficientes son 1 y 5, tal como se indica en la reacción siguiente:



- La velocidad de combustión laminar (m/s), que es la que tiene la llama en la nube en ausencia de turbulencia. Su valor depende del combustible.
- La entalpía de combustión, que es la energía liberada en la reacción de combustión por unidad de masa de combustible.

GRÁFICAS Y ZONAS DE PLANIFICACIÓN

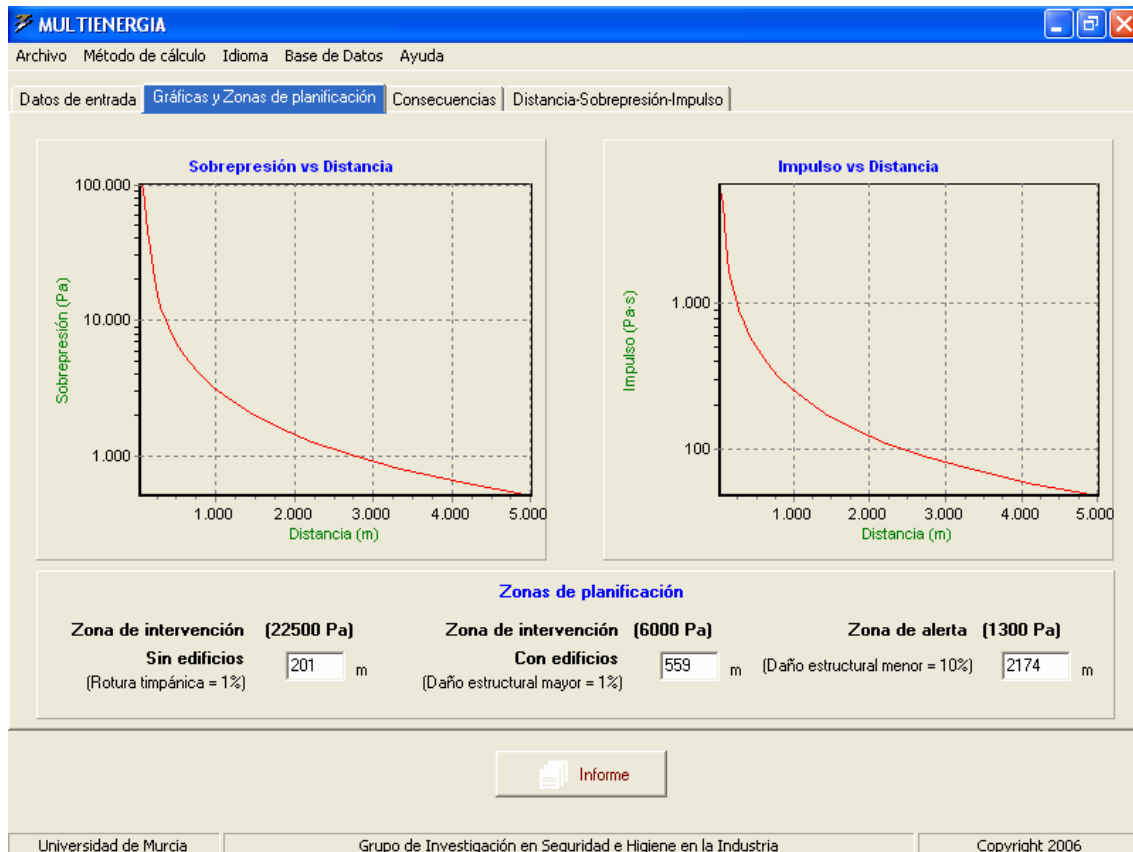


FIGURA 7.16. Pantalla de *gráficas y Zonas de Planificación*

La pantalla esta dividida en dos zonas:

- Gráficas
- Zonas de Planificación

Gráficas

Son las representaciones gráficas de la sobrepresión e impulso frente a la distancia al origen de la explosión. Disponen de un zoom dinámico que permite ampliar o reducir la zona de la gráfica que se desea visualizar con mayor precisión. Para ampliar la zona se remarca la misma presionando el botón izquierdo del ratón –figura 7.17-. Para volver al estado original se remarca una zona de la gráfica y se sobrepasan los ejes –figura 7.18-.

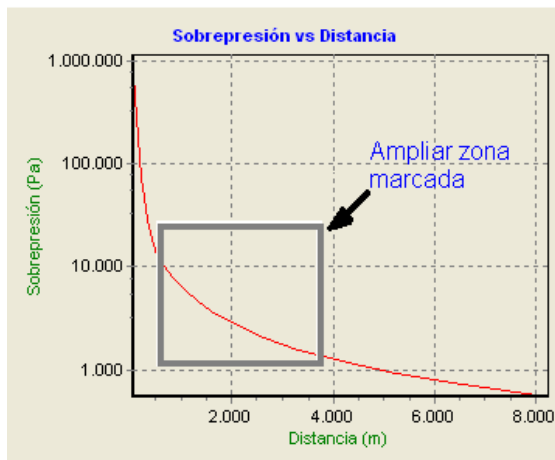


FIGURA 7.17. Ampliar zona

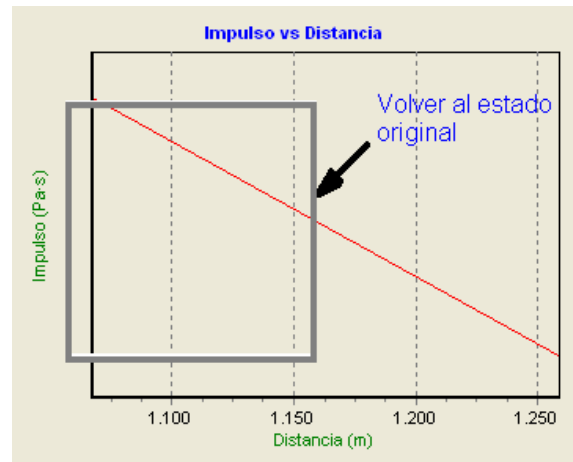


FIGURA 7.18. Volver al estado original

Zonas de Planificación

La información suministrada es la siguiente:

- **Zona de intervención sin edificios**– Cuando en el escenario accidental no hay edificaciones, la distancia de intervención corresponde a aquella en la que el 1% de la población expuesta sufriría rotura timpánica.
- **Zona de intervención con edificios**– Cuando en el escenario accidental hay edificaciones, la distancia de intervención corresponde a aquella en la que el 1% de los edificios expuestos sufriría daño estructural mayor.
- **Zona de alerta** – Es la distancia a la que se produce el 10% de daño estructural menor en edificios.

CONSECUENCIAS

Distancia al origen:	300 m	500 m	800 m
Sobrepresión	12000 Pa	6800 Pa	4000 Pa
Impulso	860 Pa·s	510 Pa·s	310 Pa·s
Rotura timpánica	0 %	0 %	0 %
Muerte impacto cráneo	0 %	0 %	0 %
Muerte impacto cuerpo	0 %	0 %	0 %
Hemorragia pulmonar	0 %	0 %	0 %
Edificios no dañados	17 %	35 %	56 %
Daño estructural menor	63 %	63 %	44 %
Daño estructural mayor	17 %	2 %	0 %
Colapso de edificios	3 %	0 %	0 %

FIGURA 7.19. Pantalla de consecuencias de la explosión de nubes de vapor

Indica las magnitudes peligrosas y efectos de la explosión a las distancias introducidas. Tiene dos zonas:

- **Sobrepresión e impulso**
- **Porcentajes de afectados**

Sobrepresión e impulso

- **Sobrepresión** – Es la sobrepresión estática de la onda (Pa) a las distancias introducidas en la pantalla de Datos de entrada.
- **Impulso** – Es el que se produciría a las distancias anteriores (Pa·s).

Porcentajes de afectados

Para cada una de las distancias introducidas en la pantalla de Datos de entrada se indican los porcentajes de individuos que probablemente:

- Sufrirían **rotura timpánica**
- Morirían por **hemorragia pulmonar**

- Morirían por **caída e impacto con el cuerpo**
- Morirían por **caída e impacto con el cráneo**

También se indican los porcentajes de edificios que probablemente:

- No sufrirían **ningún daño**
- Sufrirían **daño estructural menor**
- Sufrirían **daño estructural mayor**
- Sufrirían **colapso total o parcial**

DISTANCIA-SOBREPRESIÓN-IMPULSO

Muestra una tabla de resultados numéricos entre los límites fijados por el usuario en la Pantalla de Datos de Entrada.

The screenshot shows the MULTIENERGIA software interface. The title bar reads 'MULTIENERGIA' and the menu bar includes 'Archivo', 'Método de cálculo', 'Idioma', 'Base de Datos', and 'Ayuda'. The main window has tabs for 'Datos de entrada', 'Gráficas y Zonas de planificación', 'Consecuencias', and 'Distancia-Sobrepresión-Impulso'. Two tables are displayed side-by-side, each with three columns: 'Distancia (m)', 'Sobrepresión (Pa)', and 'Impulso (Pa·s)'. The left table lists distances from 100 to 1600 m, and the right table lists distances from 1700 to 3200 m. Both tables show a decreasing trend in overpressure and impulse as distance increases. At the bottom of the window, there is an 'Informe' button and a footer with 'Universidad de Murcia', 'Grupo de Investigación en Seguridad e Higiene en la Industria', and 'Copyright 2006'.

Distancia (m)	Sobrepresión (Pa)	Impulso (Pa·s)
100	61654	2442
200	22618	1317
300	12085	866
400	8742	643
500	6800	510
600	5538	423
700	4656	360
800	4006	314
900	3509	278
1000	3116	249
1100	2799	226
1200	2538	206
1300	2319	190
1400	2134	176
1500	1974	164
1600	1836	153

Distancia (m)	Sobrepresión (Pa)	Impulso (Pa·s)
1700	1715	144
1800	1608	136
1900	1513	128
2000	1428	122
2100	1352	116
2200	1283	110
2300	1220	105
2400	1163	101
2500	1111	97
2600	1063	93
2700	1019	89
2800	978	86
2900	940	83
3000	905	80
3100	872	77
3200	841	75

FIGURA 7.20. Pantalla de tabla de resultados numéricos distancia-sobrepresión-impulso para las explosiones de nubes de vapor

MÓDULO 4 – ESTALLIDO DE RECIPIENTES (MÉTODO BAKER Y ALCANCE MÁXIMO DE FRAGMENTOS -TNO-)

Este modelo permite obtener:

- La sobrepresión y el impulso provocados por el estallido de recipientes. .
- Las representaciones gráficas sobrepresión-distancia e impulso-distancia.
- Una tabla de datos numéricos distancia-sobrepresión-impulso
- Los porcentajes de humanos y edificios afectados a las distancias introducidas.
- El alcance máximo de los fragmentos.
- Las Zonas de Planificación.

DATOS DE ENTRADA

FIGURA 7.21. Pantalla de datos de entrada para los métodos Baker (estallido de recipientes) y TNO (alcance de fragmentos)

En el menú desplegable “Sustancia” se selecciona la requerida.

La pantalla de *datos de entrada* está dividida en cinco zonas:

- Información sobre el recipiente
- Información adicional
- Condiciones de operación
- Distancia-Sobrepresión-Impulso
- Distancias a las que se desea conocer los efectos

Información sobre el recipiente

En esta zona se introducen las características siguientes:

- **Geometría** – Al pulsar se despliega y se selecciona el tipo de recipiente, “esférico” o “cilíndrico”.
- **Diámetro** - Es el diámetro del recipiente.
- **Longitud** - Se activa si el recipiente es cilíndrico.
- **Masa del recipiente vacío** – Se refiere a la masa del recipiente sin el contenido. Puede ser introducida en kg o en Tm, haciendo clic con el botón derecho del ratón sobre la etiqueta “kg” ó el símbolo triangular, a la derecha del cuadro de edición donde se introduce la masa.
- **Altura sobre el suelo** - Es la elevación del recipiente (desde el suelo a su punto medio, m).

Los datos numéricos aceptan la forma exponencial, ejemplo: 3000=3E3. El punto o la coma indican un número con cifras.

Información adicional

En esta zona se introducen las características siguientes:

- **Causa del estallido** –Las posibles opciones son las siguientes:
 1. **Corrosión, fatiga o impacto externo.** La rotura del recipiente se produce por defectos del material y no por una sobrepresión interna, por lo que la presión de fallo es la de operación.
 2. **Fuego externo.** El estallido se produce por la acción de un fuego externo, que eleva la presión y la temperatura en el interior del recipiente, produciéndose el estallido en el momento en el que se supera la resistencia del material. Un ejemplo típico es la BLEVE.
 3. **Sobrellenado o sobrecalentamiento combinado con fallo de la válvula de seguridad.** El estallido se produce como consecuencia del aumento de la presión interna del equipo por sobrecalentamiento o sobrellenado, siendo la válvula de seguridad incapaz de aliviarla.

4. **Reacción fuera de control.** La rotura se produce por el aumento de presión producido por una reacción fuera de control, que genera sustancias no deseadas o que se produce a una velocidad superior a la normal.
 5. **Explosión interna.** La explosión interna se produce cuando un combustible (propano, por ejemplo) reacciona con el aire en el interior del recipiente de forma explosiva. La presión de rotura dependerá de la composición de la mezcla combustible-aire.
 6. **Descomposición de sustancias energéticas.** La explosión se produce por la descomposición de una sustancia sin necesidad de que intervenga un comburente. Un ejemplo típico es el nitrometano.
- **Composición de la mezcla** – En caso de haber seleccionado como causa del estallido “Explosión interna” se activa este menú desplegable y se debe indicar si la mezcla es estequiométrica o si está más próxima a los límites de explosividad.
 - **Contenido del recipiente** - Debe indicarse si el recipiente contiene un “gas permanente o vapor sobrecalentado” o bien una “mezcla líquido-vapor”.
 - **Volumen de líquido**- Si se ha seleccionado “mezcla líquido-vapor” en la opción anterior o “Descomposición de sustancias energéticas” como causa de la explosión, se activa este cuadro de edición y se debe introducir el porcentaje de volumen del recipiente ocupado por el líquido.
 - **BLEVE** - Si el recipiente contiene una mezcla líquido-vapor, debe indicarse si el estallido es de tipo BLEVE.

Condiciones de operación

Se puede optar por introducir la **presión absoluta** de rotura o permitir que la calcule el programa a partir de las **presiones absolutas** de trabajo, la presión de abertura de la válvula de seguridad o la presión de diseño.

En esta zona se introduce también la temperatura del gas o vapor comprimido en el interior del recipiente en los casos en que sea necesario. Las presiones pueden ser introducidas en Pa o en bar, haciendo clic con el botón derecho del ratón sobre la etiqueta “Pa” o sobre el símbolo triangular. De la misma forma, la temperatura puede introducirse en K o en °C.

Distancia-Sobrepresión-Impulso

El usuario puede indicar qué variable (distancia, sobrepresión o impulso) desea que se tome como referencia y entre qué límites. Los resultados numéricos distancia-sobrepresión-impulso estarán comprendidos entre los límites introducidos.

Debido a la utilización de coeficientes de corrección de la sobrepresión y del impulso en el método de Baker, la representación de la sobrepresión o del impulso frente a la distancia es similar a la que se indica en la siguiente figura.

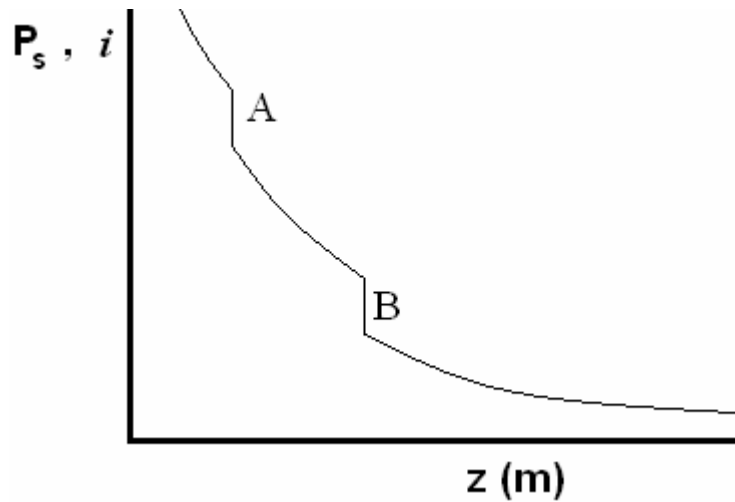


FIGURA 7.22. Representación de la sobrepresión o del impulso frente a la distancia para el método de Baker

Cuando se selecciona como variable de referencia la distancia, el informe genera una tabla de datos en la que a cada distancia corresponde una única sobrepresión y un único impulso (los tramos A y B no se detectan si se entra por abscisas), mientras que si las variables de referencia seleccionadas son alguna de estas dos últimas (P_s o i), pueden aparecer varias sobrepresiones o varios impulsos que correspondan a una misma distancia en los intervalos A y B.

Distancias a las que se desean conocer los efectos

El usuario puede introducir una, dos o las tres distancias.

Introducción de una nueva sustancia en la base de datos

Si la sustancia deseada no se encuentra en el menú desplegable, se puede pulsar el botón “Nueva sustancia” para introducir una nueva sustancia en la base de datos, mostrándose la siguiente pantalla:

FIGURA 7.23. Pantalla de introducción de una nueva sustancia para el método de Baker

Para incluir una nueva sustancia en la base de datos debe introducirse lo siguiente:

1. Nombre, masa molecular y constante de Poisson.
2. Si puede almacenarse como mezcla líquido-vapor, debe marcarse la casilla correspondiente. En este caso se habilitan las propiedades que se indican en las solapas de la parte superior de la ventana, esto es:
 - Entalpías del líquido y vapor saturados.
 - Volúmenes del líquido y vapor saturados.
 - Entropías del líquido y vapor saturados.
3. Si se trata de una sustancia que puede descomponerse mediante una reacción redox interna que dé origen a gases, debe activarse la opción correspondiente. En este caso debe introducirse la entalpía de la reacción de descomposición y la densidad de la fase líquida.
4. Si el estallido es debido a una explosión interna o una reacción fuera de control debe activarse la opción correspondiente. En este caso debe introducirse la entalpía de la reacción y la velocidad de combustión laminar.

En caso de que la sustancia pueda encontrarse como mezcla líquido-vapor, se habilitan los cuadros de edición de las solapas de la curva de equilibrio del líquido y vapor saturados, debiéndose introducir las siguientes propiedades: entalpías específicas, volúmenes específicos y entropías específicas de ambas

fases. Este proceso se realiza por medio de la introducción de los ocho puntos que se consideren más representativos de cada una de las variables anteriores con respecto a la presión de equilibrio líquido-vapor (debiendo corresponder el primero y el último de dichos puntos a las presiones atmosférica y crítica, respectivamente). Si no se tiene información de la totalidad de la curva, puede introducirse sólo el tramo disponible, pero únicamente se podrán simular estallidos de recipientes cuya presión esté dentro de dicho intervalo. Los puntos se introducen en forma de parejas de valores (x, y) , siendo x la presión e y la variable correspondiente. Si falta algún dato termodinámico por introducir o si las presiones introducidas no siguen un orden creciente, al pulsar el botón “Guardar” se muestra un mensaje de error.

Es importante seleccionar adecuadamente los puntos que se introducen a la base de datos, dado que el modelo utiliza el valor de la propiedad mediante la interpolación de dichos datos. Para ello, conviene representar gráficamente la variable específica frente a la presión y seleccionar los puntos que mejor reproduzcan dicha curva, que el modelo asimila a una sucesión de segmentos.

Por ejemplo, partiendo de la figura 7.24 (que representa en este caso una relación genérica entalpía-presión), se debe seleccionar los ocho puntos más representativos para poder asimilar la curva a una sucesión de segmentos (figura 7.25).

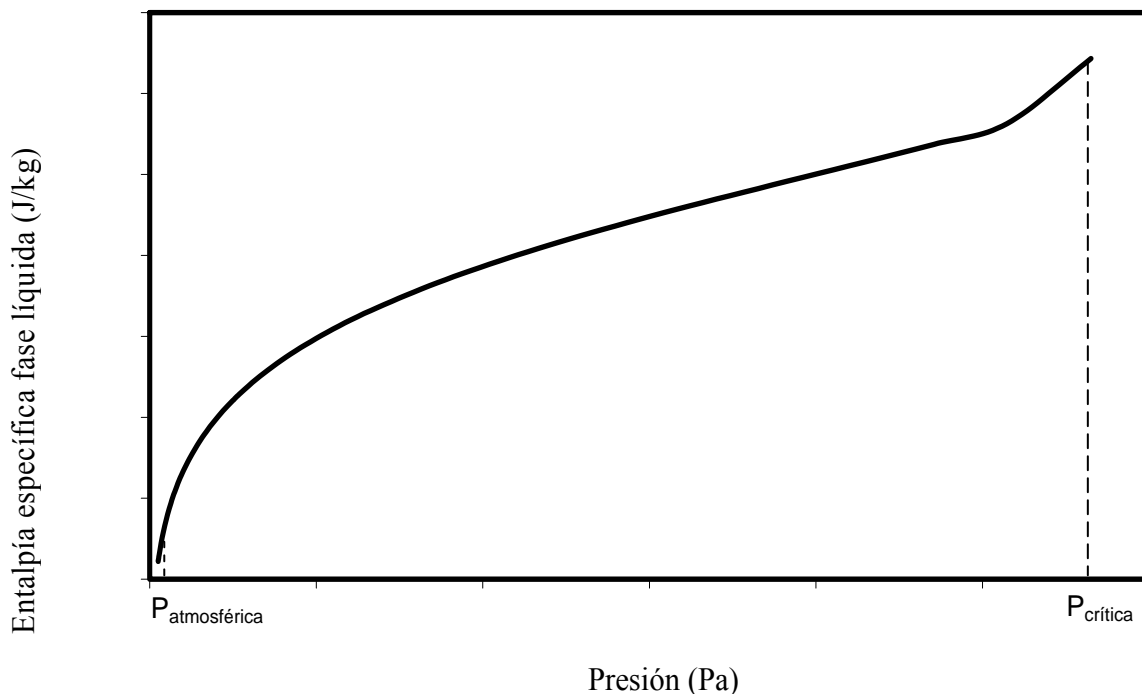


FIGURA 7.24. Representación genérica de la entalpía específica de la fase líquida frente a la presión

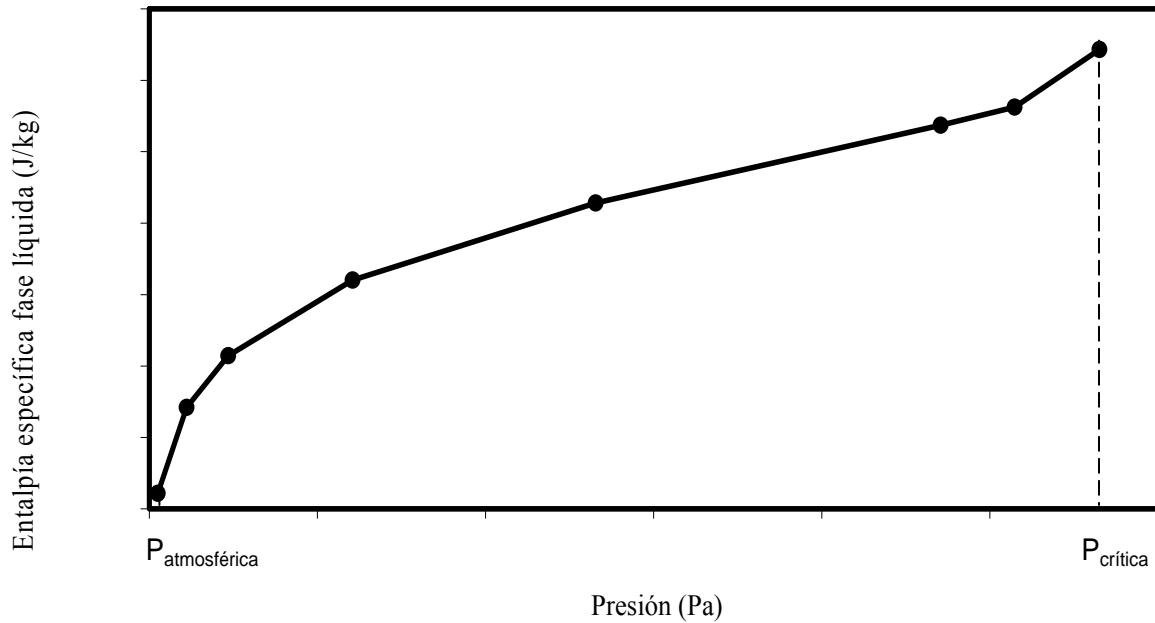


FIGURA 7.25. Introducción de ocho puntos de una curva genérica de la entalpía específica de la fase líquida frente a la presión, que ZEUS asocia a una sucesión de segmentos.

En la figura 7.26 se muestra la pantalla correspondiente a la *Entalpía del líquido saturado*:

La imagen muestra una ventana de software titulada 'NUEVA SUSTANCIA'. En la parte superior hay una barra de pestañas con las siguientes opciones: 'Propiedades constantes', 'Entalpía líquido saturado', 'Entalpía vapor saturado', 'Volumen líquido saturado' y 'Volumen'. La pestaña 'Entalpía líquido saturado' está seleccionada. El formulario está dividido en dos columnas: 'Presión' y 'Entalpía específica'.
 En la columna 'Presión', hay campos de entrada para: 'Presión atmosférica (P0)', 'P1', 'P2', 'P3', 'P4', 'P5', 'P6' y 'Presión crítica (Pc)'. El campo 'P0' contiene el valor '101325'.
 En la columna 'Entalpía específica', hay campos de entrada para: 'h liq 0', 'h liq 1', 'h liq 2', 'h liq 3', 'h liq 4', 'h liq 5', 'h liq 6' y 'h liq c'.
 Entre las columnas, hay un texto que dice: 'Introduzca 8 puntos de la curva de entalpía específica del vapor saturado'.
 En la parte inferior del formulario hay un botón que dice 'Guardar'.

FIGURA 7.26. Pantalla de Entalpía del líquido saturado

GRÁFICAS Y ZONAS DE PLANIFICACIÓN

La pantalla esta dividida en dos zonas:

- Gráficas
- Distancias características de daños y alcance máximo de los fragmentos para establecer las Zonas de Planificación.

Gráficas

Son las representaciones gráficas de la sobrepresión e impulso frente a la distancia al origen de la explosión. Disponen de un zoom dinámico que permite ampliar o reducir la zona de la gráfica que se desea visualizar con mayor precisión. Para ampliar la zona se remarca la misma presionando el botón izquierdo del ratón –figura 7.27-. Para volver al estado original se remarca una zona de la gráfica y se sobrepasan los ejes –figura 7.28-.

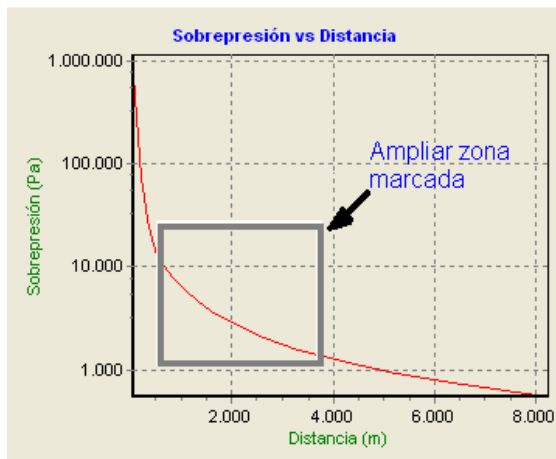


FIGURA 7.27. Ampliar zona

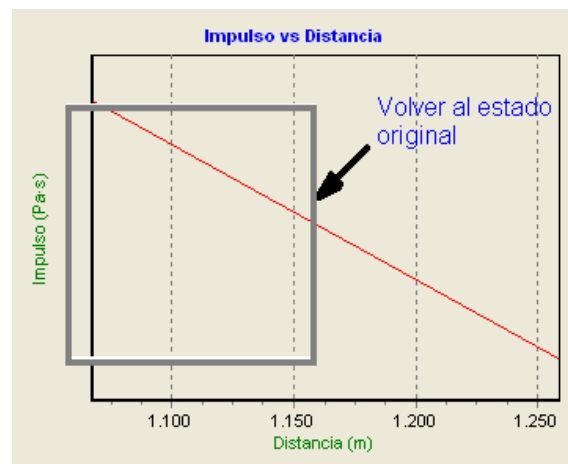


FIGURA 7.28. Volver al estado original

Zonas de Planificación


Conviene indicar que las Zonas de Planificación se establecen de acuerdo a los siguientes criterios:

- **Zona de intervención sin edificios**– Cuando en el escenario accidental no hay edificaciones, la distancia de intervención corresponde a la mayor entre aquella donde el 1% de la población expuesta sufriría rotura timpánica y el alcance máximo de los fragmentos.
- **Zona de intervención con edificios**– Cuando en el escenario accidental hay edificaciones, la distancia de intervención corresponde a la mayor


entre aquella donde el 1% de los edificios expuestos sufriría daño estructural mayor y el alcance máximo de los fragmentos.

- **Zona de alerta** – Es aquella a la que se produce el 10% de daño estructural menor en edificios.

Las Zonas de Planificación se identifican mediante el código de colores siguiente:

Zona de Intervención sin edificios: 

Zona de Intervención con edificios: 

Zona de Alerta: 

La Zona de Intervención puede estar delimitada por alguna de las distancias siguientes:

- El alcance de los fragmentos.
- La distancia a la que se produciría el 1% de rotura timpánica -si no hay edificios- o, si los hubiera, donde se produzca el 1% de daño estructural mayor.

En la figura 7.29 se presenta un caso donde la Zona de Intervención sin edificios está condicionada por el alcance máximo de los fragmentos (113 m) pero, si hubiera edificios, lo estaría por la distancia correspondiente al 1% de daño estructural mayor (125 m). Puede darse el caso de que la Zona de Intervención sea la misma en presencia o ausencia de edificios, si el alcance de los fragmentos supera al 1% de daño estructural mayor o, incluso, que no se establezca Zona de Alerta si el alcance de los fragmentos supera a la distancia del 10% de daño estructural menor (figura 7.30).

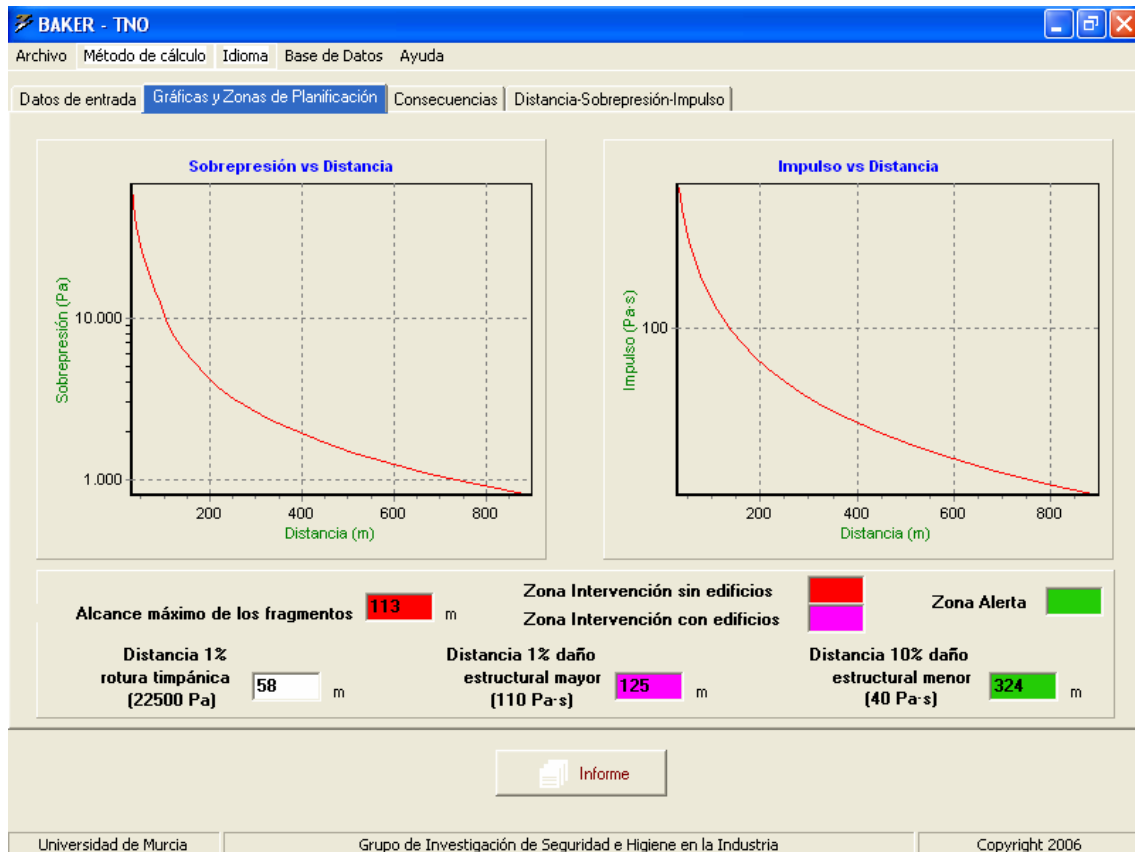


FIGURA 7.29. Pantalla de gráficas y Zonas de Planificación (la Zona de Intervención sin edificios viene determinada por el alcance de los fragmentos, al superar a la distancia a la que se produce el 1% de rotura timpánica)

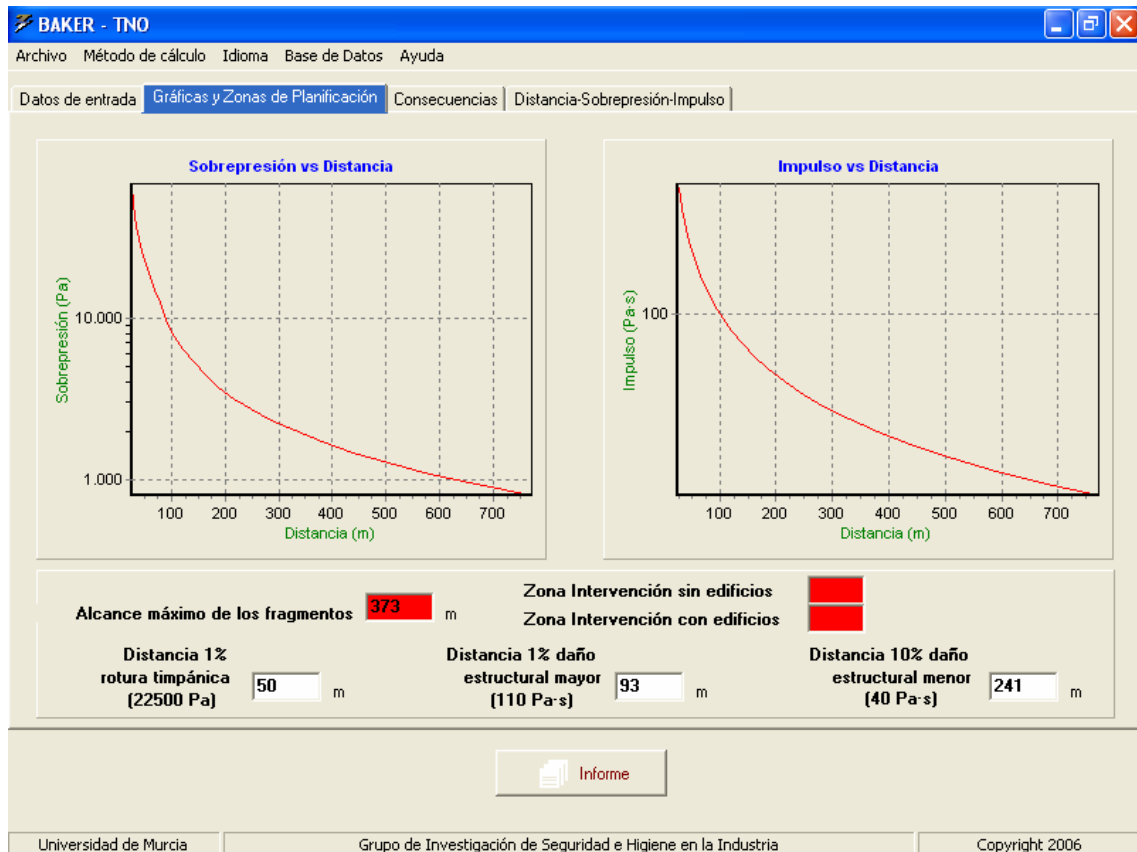


FIGURA 7.30. Pantalla de gráficas y Zonas de Planificación (no se establece Zona de Alerta al superar el alcance de los fragmentos al 10% de daño estructural menor)

CONSECUENCIAS

Distancia al origen: 125 m	Distancia al origen: 300 m	Distancia al origen: 500 m
Sobrepresión: 19100 Pa	Sobrepresión: 6300 Pa	Sobrepresión: 3300 Pa
Impulso: 860 Pa·s	Impulso: 340 Pa·s	Impulso: 200 Pa·s
Rotura timpánica: 0 %	Rotura timpánica: 0 %	Rotura timpánica: 0 %
Muerte impacto cráneo: 0 %	Muerte impacto cráneo: 0 %	Muerte impacto cráneo: 0 %
Muerte impacto cuerpo: 0 %	Muerte impacto cuerpo: 0 %	Muerte impacto cuerpo: 0 %
Hemorragia pulmonar: 0 %	Hemorragia pulmonar: 0 %	Hemorragia pulmonar: 0 %
Edificios no dañados: 8 %	Edificios no dañados: 38 %	Edificios no dañados: 63 %
Daño estructural menor: 35 %	Daño estructural menor: 60 %	Daño estructural menor: 37 %
Daño estructural mayor: 46 %	Daño estructural mayor: 1 %	Daño estructural mayor: 0 %
Colapso de edificios: 11 %	Colapso de edificios: 0 %	Colapso de edificios: 0 %

FIGURA 7.31. Pantalla de consecuencias del estallido de recipientes

Indica las magnitudes peligrosas y efectos de la explosión a las distancias introducidas. Tiene dos zonas:

- **Sobrepresión e impulso**
- **Porcentajes de afectados**

Sobrepresión e impulso

- **Sobrepresión** – Es la sobrepresión estática de la onda (Pa) a las distancias introducidas en la pantalla de Datos de entrada.
- **Impulso** – Es el que se produciría a las distancias anteriores (Pa·s).

Porcentajes de afectados

Para cada una de las distancias introducidas en la pantalla de Datos de entrada se indican los porcentajes de individuos que probablemente:

- Sufrirían **rotura timpánica**
- Morirían por **hemorragia pulmonar**
- Morirían por **caída e impacto con el cuerpo**

- Morirían por **caída e impacto con el cráneo**

También se indican los porcentajes de edificios que probablemente:

- No sufrirían **ningún daño**
- Sufrirían **daño estructural menor**
- Sufrirían **daño estructural mayor**
- Sufrirían **colapso total o parcial**

DISTANCIA-SOBREPRESIÓN-IMPULSO

Muestra una tabla de resultados numéricos entre los límites fijados por el usuario en la Pantalla de Datos de Entrada.

The screenshot shows the 'MULTIENERGIA' software interface. The main window displays two tables of numerical results for distance, overpressure, and impulse. The interface includes a menu bar with 'Archivo', 'Método de cálculo', 'Idioma', 'Base de Datos', and 'Ayuda'. The main content area has tabs for 'Datos de entrada', 'Gráficas y Zonas de planificación', 'Consecuencias', and 'Distancia-Sobrepresión-Impulso'. Below the tables is an 'Informe' button. The footer contains 'Universidad de Murcia', 'Grupo de Investigación en Seguridad e Higiene en la Industria', and 'Copyright 2006'.

Distancia (m)	Sobrepresión (Pa)	Impulso (Pa·s)
100	61654	2442
200	22618	1317
300	12085	866
400	8742	643
500	6800	510
600	5538	423
700	4656	360
800	4006	314
900	3509	278
1000	3116	249
1100	2799	226
1200	2538	206
1300	2319	190
1400	2134	176
1500	1974	164
1600	1836	153

Distancia (m)	Sobrepresión (Pa)	Impulso (Pa·s)
1700	1715	144
1800	1608	136
1900	1513	128
2000	1428	122
2100	1352	116
2200	1283	110
2300	1220	105
2400	1163	101
2500	1111	97
2600	1063	93
2700	1019	89
2800	978	86
2900	940	83
3000	905	80
3100	872	77
3200	841	75

FIGURA 7.32. Pantalla de tabla de resultados numéricos distancia-sobrepresión-impulso para los estallidos de recipiente

MÓDULO 5 – INFORME DE SALIDA

Una vez concluido el proceso de cálculo, se puede acceder a un informe que contiene todas las características de la explosión simulada. En este caso se incluye el correspondiente a una explosión de nube de vapor que se calcula con el modelo Multienergía.

Se accede mediante el botón *Informe*, en la pantalla de trabajo:

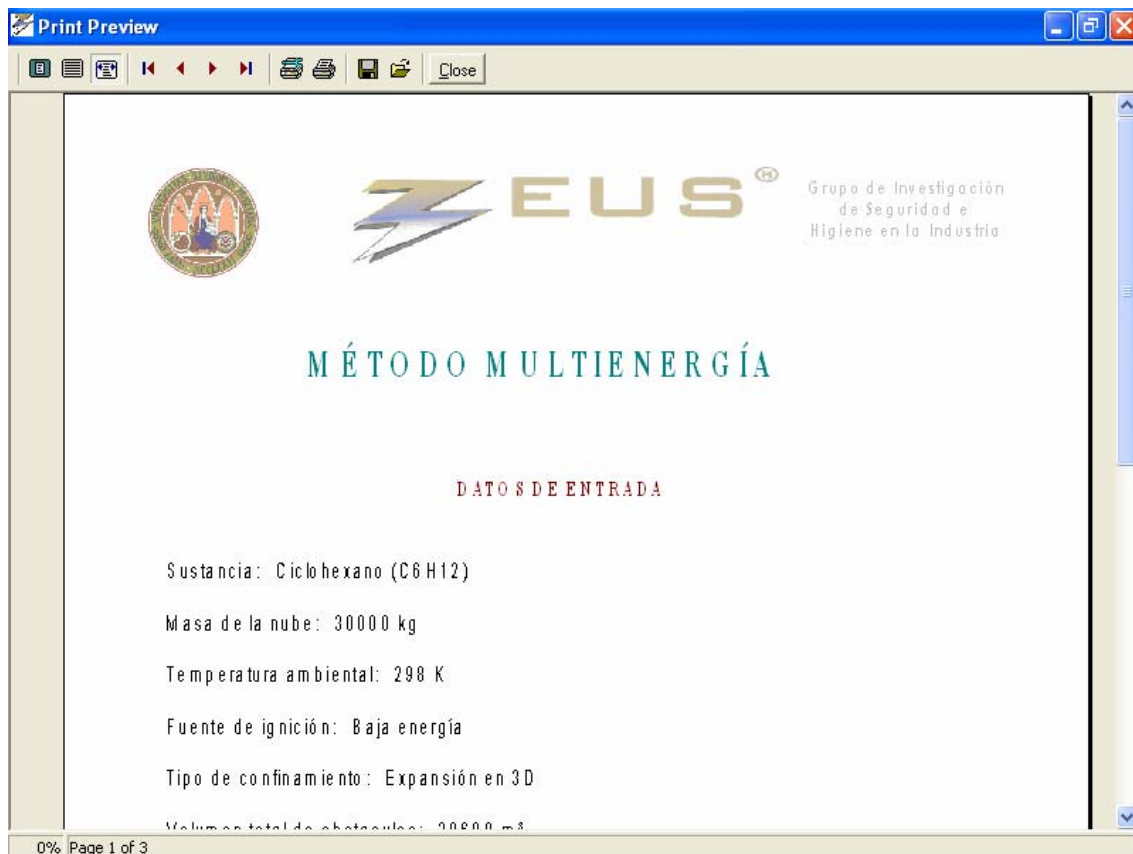
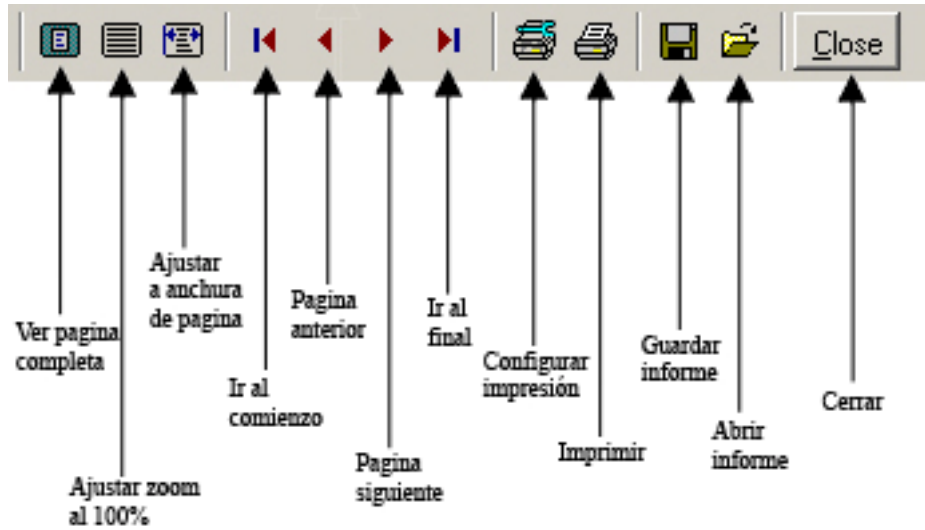


FIGURA 7.33. Pantalla inicial del informe de salida

La barra de herramientas situada en la parte superior izquierda del informe de salida (ver figura 7.33) tiene las siguientes opciones:



El informe se estructura en cuatro páginas. Cada una de ellas contiene la información que se indica a continuación.

PÁGINA 1

En esta página se indican los datos de entrada (información general de la explosión) y las Zonas de Planificación.



Grupo de Investigación
de Seguridad e
Higiene en la Industria

MÉTODO MULTIENERGÍA

DATOS DE ENTRADA

Sustancia: Ciclohexano (C₆H₁₂)

Masa de sustancia en la nube: 30000 kg

Temperatura ambiental: 288 K

Fuente de ignición:

Tipo de confinamiento:

Volumen total de obstáculos:

Área superficial de obstáculos:

% nube obstruida: 100

Energía de la explosión: 1,32 E+12 J

Nivel de la explosión: 10

ZONAS DE PLANIFICACIÓN

Zona intervención: Sin edificios: 376 m
(Rotura timpánica 1%)

Zona intervención: Con edificios: 1046 m
(Daño estructural mayor 1%)

Zona alerta: 4071 m
(Daño estructural menor 10%)

PÁGINA 2

En esta página se indican la sobrepresión, impulso y las consecuencias del accidente a las distancias introducidas.



Grupo de Investigación
de Seguridad e
Higiene en la Industria

CONSECUENCIAS

Distancia 1: 300 m

Distancia 2: 700 m

Distancia 3: 1200 m

Sobrepresión: 37522 Pa

Sobrepresión: 9637 Pa

Sobrepresión: 5160 Pa

Impulso: 2444 Pa·s

Impulso: 1158 Pa·s

Impulso: 732 Pa·s

Porcentaje de afectados: Personas

Distancia 1: 300 m

Distancia 2: 700 m

Distancia 3: 1200 m

Rotura timpánica: 6 %

Rotura timpánica: 0 %

Rotura timpánica: 0 %

M. impacto craneo: 0 %

M. impacto craneo: 0 %

M. impacto craneo: 0 %

M. impacto cuerpo: 0 %

M. impacto cuerpo: 0 %

M. impacto cuerpo: 0 %

H. pulmonar: 0 %

H. pulmonar: 0 %

H. pulmonar: 0 %

Porcentaje de afectados: Edificios

Distancia 1: 300 m

Distancia 2: 700 m

Distancia 3: 1200 m

Ningún daño: 3 %

Ningún daño: 23 %

Ningún daño: 46 %

Daño menor: 3 %

Daño menor: 67 %

Daño menor: 54 %

Daño mayor: 49 %

Daño mayor: 9 %

Daño mayor: 0 %

Colapso: 46 %

Colapso: 1 %

Colapso: 0 %

PÁGINA 3

En esta página se incluye la tabla de datos numéricos de la sobrepresión y del impulso frente a la distancia, entre los límites introducidos por el usuario en la pantalla de Datos de entrada.



Grupo de Investigación
de Seguridad e
Higiene en la Industria

Distancia (m)	Sobrepresión (Pa)	Impulso (Pa·s)
200	84802	3495
329	31161	2253
458	16020	1683
587	11816	1352
716	9386	1135
845	7746	1069
974	6570	917
1103	5688	802
1232	5004	712
1361	4458	639
1490	4014	580
1619	3646	530
1748	3336	488
1877	3071	452
2006	2844	421
2135	2646	393
2265	2472	369
2394	2318	348
2523	2181	329
2652	2059	312
2781	1948	296
2910	1848	282
3039	1758	269
3168	1675	257
3297	1599	246
3426	1530	236
3555	1466	227
3684	1406	219
3813	1351	211
3942	1300	203
4071	1252	196
4200	1208	190

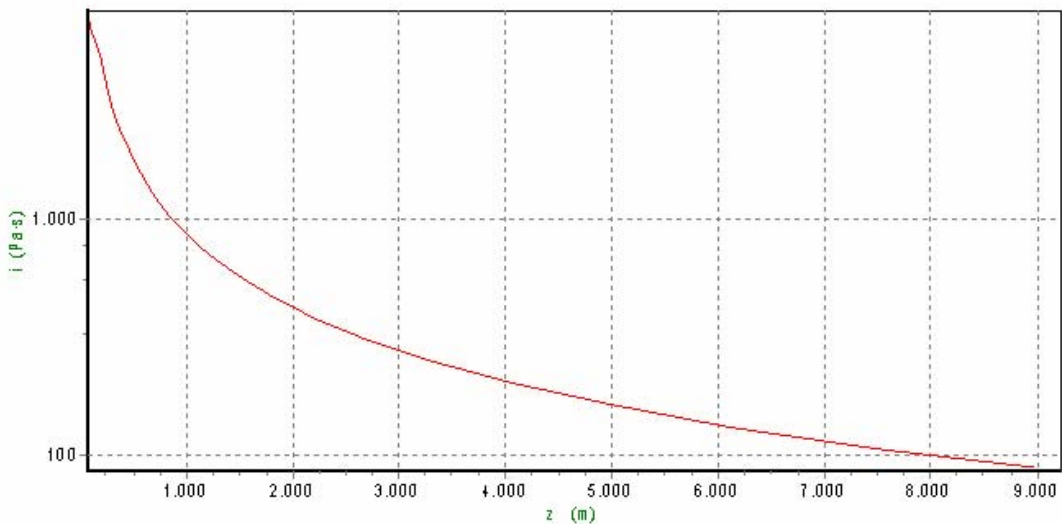
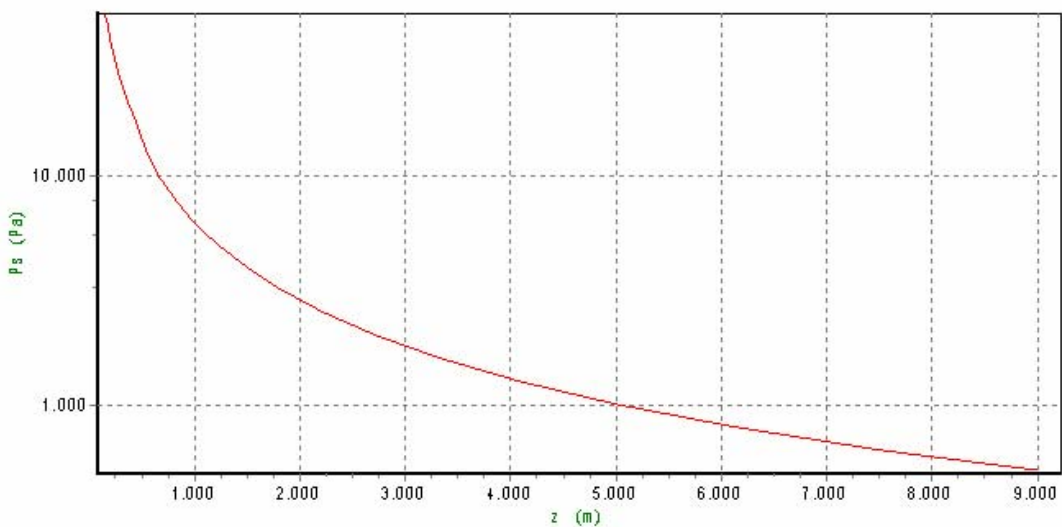
PÁGINA 4

En esta página se incluyen las representaciones gráficas de la sobrepresión y del impulso frente a la distancia.



Grupo de Investigación
de Seguridad e
Higiene en la Industria

REPRESENTACIONES GRÁFICAS



CAPÍTULO 8. COMPARACIÓN DE PROGRAMAS INFORMÁTICOS

8.1. DESCRIPCIÓN DE LOS PROGRAMAS UTILIZADOS

En este capítulo se compara **ZEUS** con algunos de los paquetes informáticos comerciales más utilizados para la simulación de accidentes industriales, como **SAFER TRACE** versión 9.0 (desarrollado por SAFER Systems, LLC.), **EFFECTS PLUS** V.5 (desarrollado por TNO, Department of Industrial Safety), **BREEZE HAZ** Professional versión 4.0.0 (desarrollado por Trinity Consultants, en colaboración con Gas Research Institute) y **PHAST** 6.42 (desarrollado por Det Norske Veritas). Con la comparación se pretende señalar las utilidades de los programas analizados (tipos de explosiones simuladas, información proporcionada, etc.) y comparar los resultados de varios casos hipotéticos. Con este objetivo, se describe a continuación cada uno de los programas, indicando los tipos de explosión que permiten calcular y los resultados que ofrecen.

TRACE: Resuelve **explosiones de nubes de vapor** y **estallidos de recipientes** que contengan gases y, para algunas sustancias en concreto, mezclas líquido-vapor. Proporciona la **sobrepresión y el impulso** a las **distancias introducidas (pero no el alcance máximo de los fragmentos)** y, a la inversa, la distancia a la que se producen los valores introducidos de sobrepresión e impulso, así como una tabla de datos distancia-sobrepresión-impulso.

EFFECTS: Sólo resuelve **explosiones de nubes de vapor**. Determina la **sobrepresión** y la **duración de la fase positiva de la onda** a la **distancia introducida** y las representaciones gráficas de los perfiles de sobrepresión y duración de la fase positiva.

BREEZE: Sólo resuelve **explosiones de nubes de vapor**. Informa sobre la **sobrepresión** y la **duración de la fase positiva de la onda** a las **distancias introducidas** y, al contrario, las distancias a las que se producen los valores de sobrepresión introducidos.

PHAST: Sólo resuelve **explosiones de nube de vapor**, ofreciendo como resultado una **tabla** de valores de **sobrepresión y duración de la fase positiva frente a la distancia**.

A continuación se indican los resultados proporcionados por cada programa en varios supuestos. Como ejemplos de explosiones de nubes de vapor, se han elegido las producidas de la planta de Nypro en Flixborough (Reino Unido) en 1974 y en la de Rheinische Olefinwerke en Wesseling (Alemania) en 1985 -ver anexo III-, mientras que se comparan dos estallidos de recipientes hipotéticos (con un gas permanente y otro licuado, en equilibrio líquido-vapor, respectivamente).

8.2. EXPLOSIONES DE NUBES DE VAPOR

8.2.1. Explosión de Flixborough (1974).

Como se indica en el anexo III, la nube estaba formada por 30000 kg de ciclohexano, y las sobrepresiones generadas correspondieron al nivel 10 del método Multienergía. Se analizan los resultados de sobrepresión e impulso a 100, 200, 300, 500, 800, 1000, 1500, 2000 y 3000 m. Los datos de entrada de los diferentes programas se recogen en la tabla 8.1.

TABLA 8.1. Datos de entrada para la explosión de Flixborough (1974) utilizando todos los programas informáticos evaluados

INPUTS	PROGRAMAS INFORMÁTICOS				
	BREEZE*	EFFECTS*	PHAST*	TRACE	ZEUS
Masa de sustancia en la nube (kg)	30000	30000	30000	30000	30000
Temperatura ambiental (°C)	-	25	25	25	25
Fracción de nube confinada (%)	-	100	-	-	100
Nivel de la explosión	10	10	10	10	10
Factor de eficiencia energética (%)	-	-	-	100	-
Energía de la fuente de ignición	-	-	-	Baja	-

* Estos programas no proporcionan los valores de impulso, sino la duración de la fase positiva de la onda (t_p). Los impulsos de la figura 8.1 han sido calculados con la ecuación 2.2. Para los programas BREEZE y PHAST, al no disponer del ciclohexano en su base de datos, la simulación se ha realizado con el hexano, que tiene propiedades similares al primero.

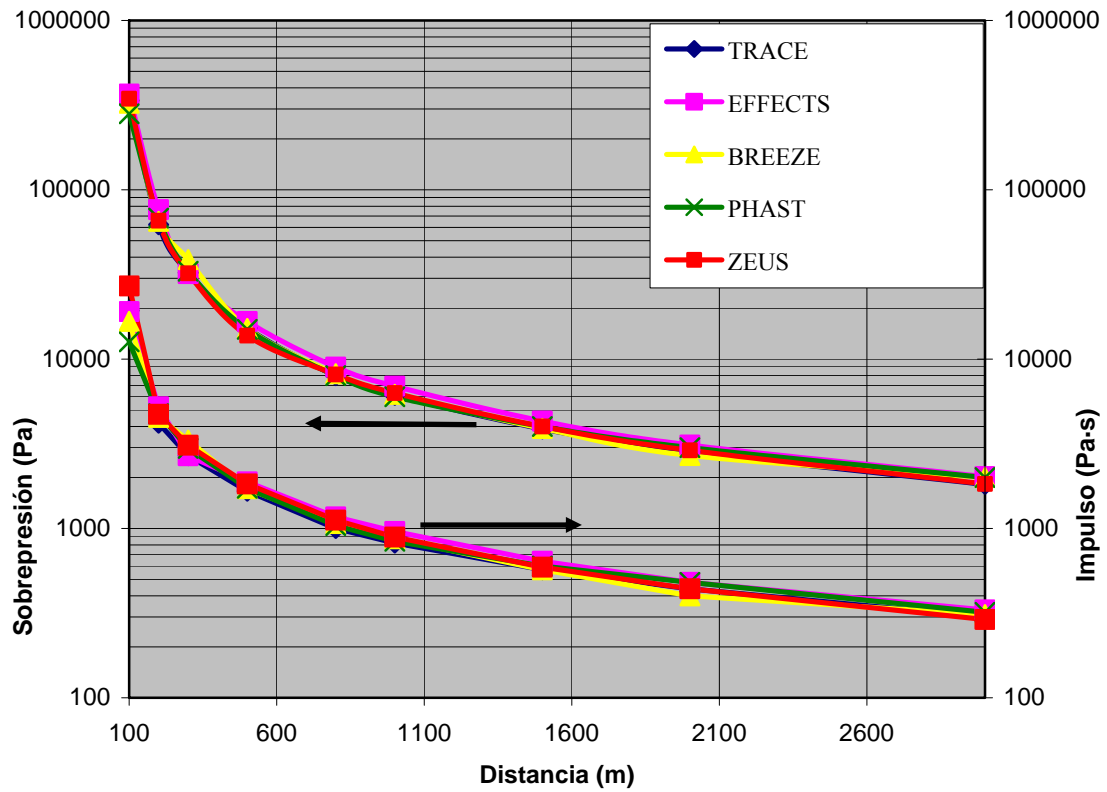


FIGURA 8.1. Sobrepresión e impulso proporcionados por los diferentes programas para la explosión de Flixborough

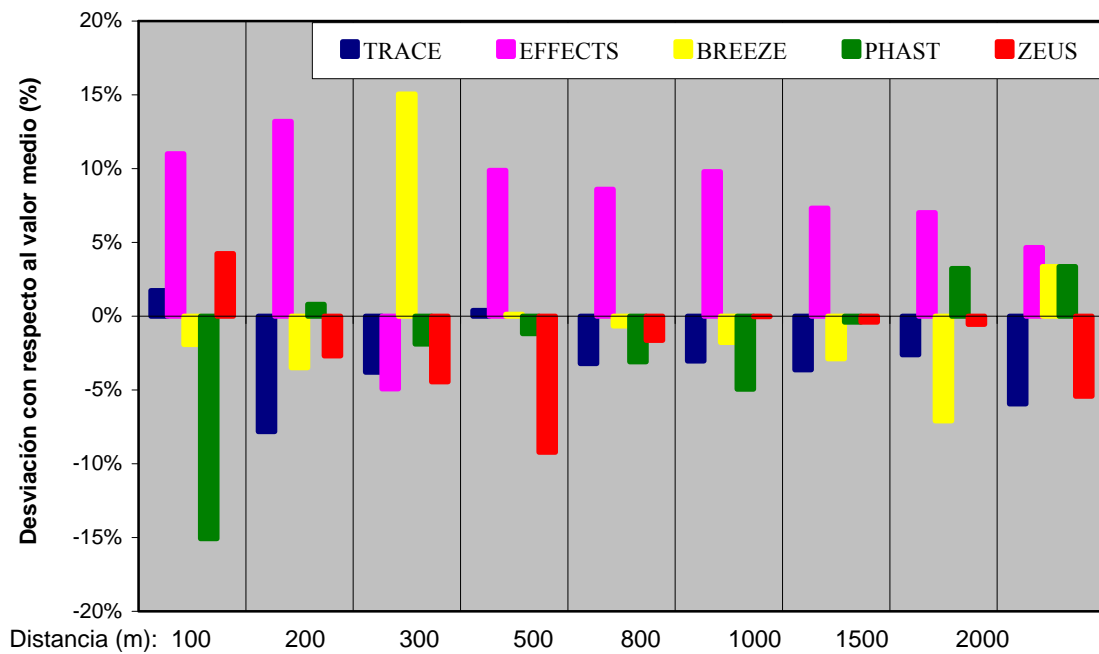


FIGURA 8.2. Desviación porcentual de los valores de sobrepresión de cada programa con respecto al valor medio de todos los programas para cada una de las distancias evaluadas

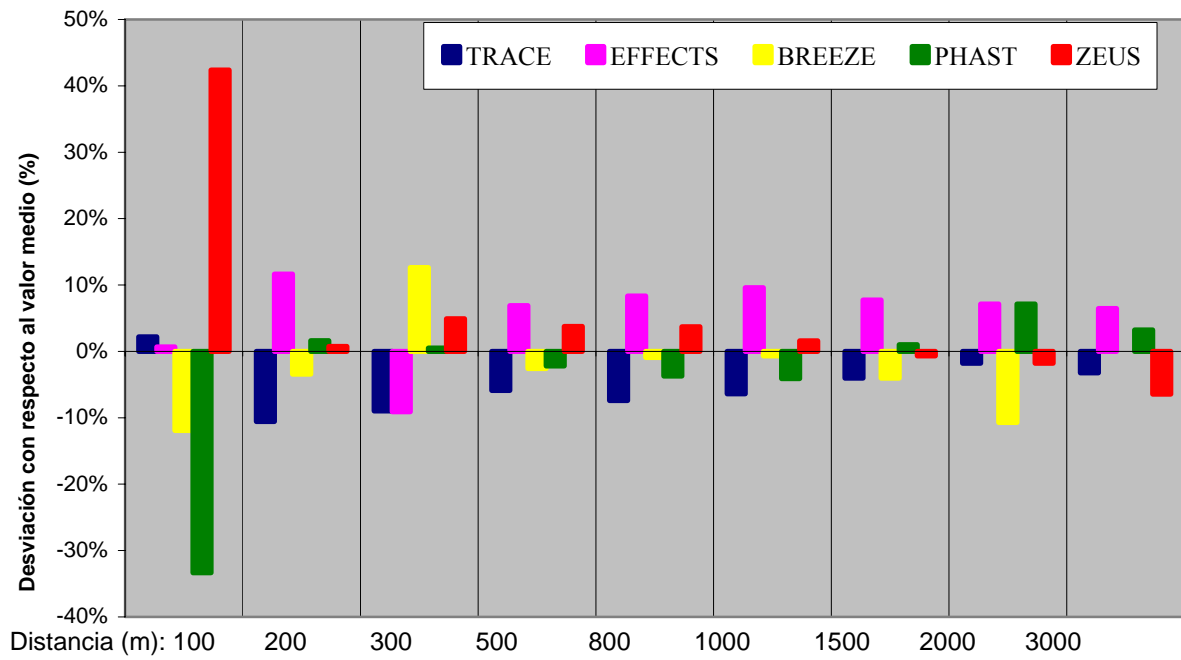


FIGURA 8.3. Desviación porcentual de los valores de impulso de cada programa con respecto al valor medio a cada distancia

Como se deduce de las figuras 8.1, 8.2 y 8.3, los resultados obtenidos por todos los programas son muy similares, presentando en la mayoría de los casos desviaciones con respecto al valor medio inferiores al 10%, excepto para la distancia más pequeña (100 m), en las que ZEUS y PHAST superan el 30% para el impulso.

8.2.2. Explosión de Wesseling (1985).

Como se indica en el anexo III, la nube estaba formada por 4100 kg de propileno y, al no disponer de información sobre el nivel de la explosión, se sigue el criterio general de TNO que recomienda seleccionar el nivel 7 del método Multienergía. Se analizan los resultados de sobrepresión e impulso a 100, 200, 300, 500, 800, 1000, 1500, 2000 y 3000 m. Los datos de entrada de los diferentes programas se indican en la tabla 8.2.

TABLA 8.2. Datos de entrada para la explosión de Wesseling (1985) utilizando todos los programas informáticos evaluados

INPUTS	PROGRAMAS INFORMÁTICOS				
	BREEZE	EFFECTS	PHAST	TRACE	ZEUS
Masa de sustancia en la nube (kg)	4100	4100	4100	4100	4100
Temperatura ambiental (°C)	-	25	25	25	25
Fracción de nube confinada (%)	-	100	-	-	100
Nivel de la explosión	7	7	7	7	7
Factor de eficiencia energética (%)	-	-	-	100	-
Energía de la fuente de ignición	-	-	-	Baja	-

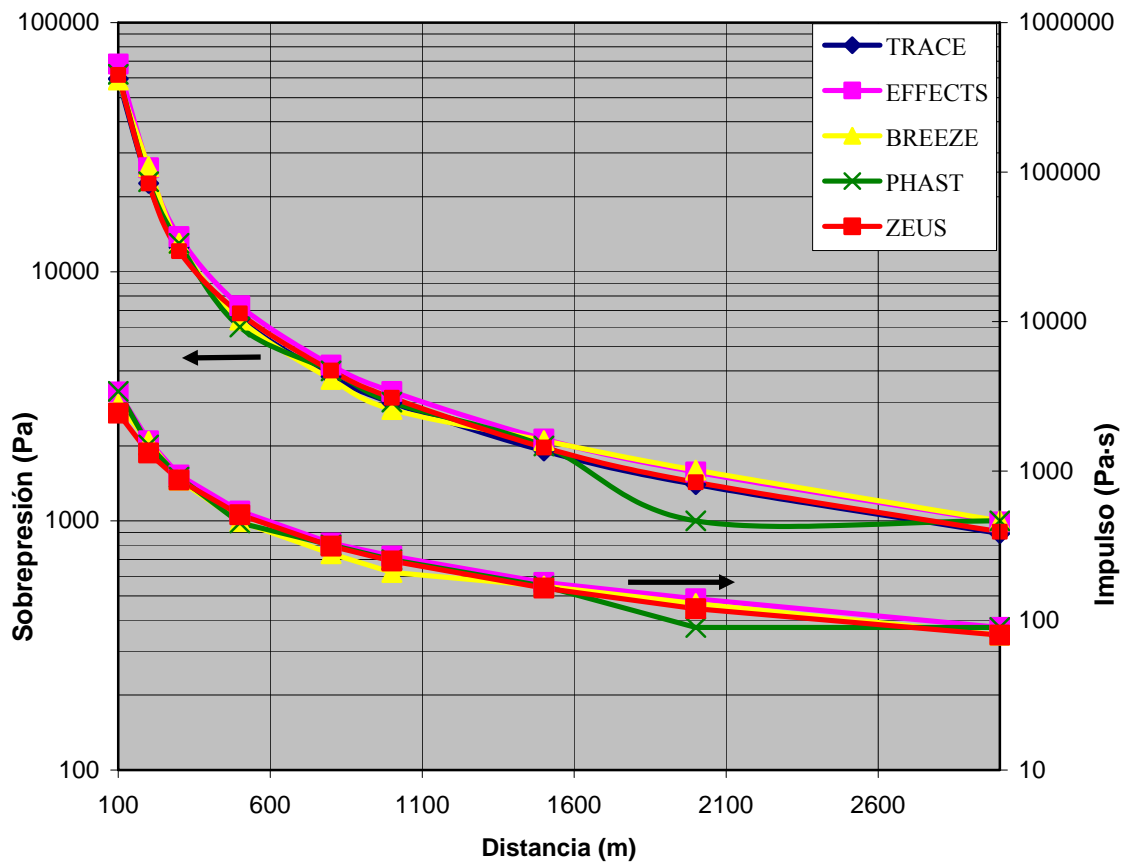


FIGURA 8.4. Sobrepresión e impulso proporcionados por los diferentes programas para la explosión de Wesseling

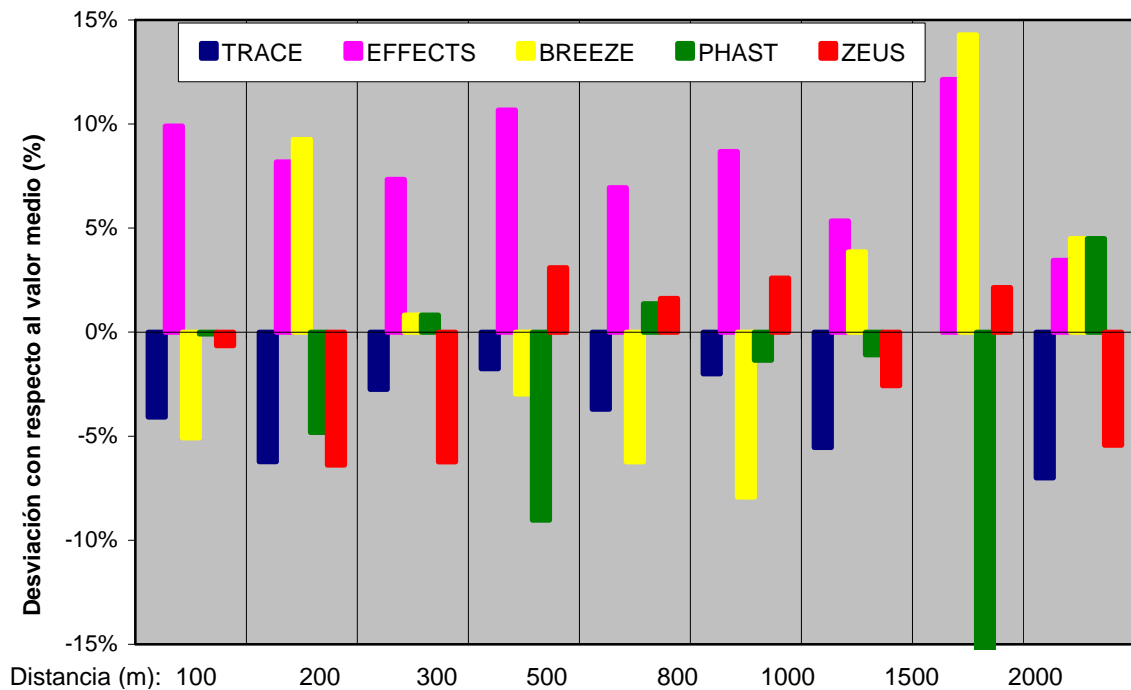


FIGURA 8.5. Desviación porcentual de los valores de sobrepresión de cada programa con respecto al valor medio a cada distancia

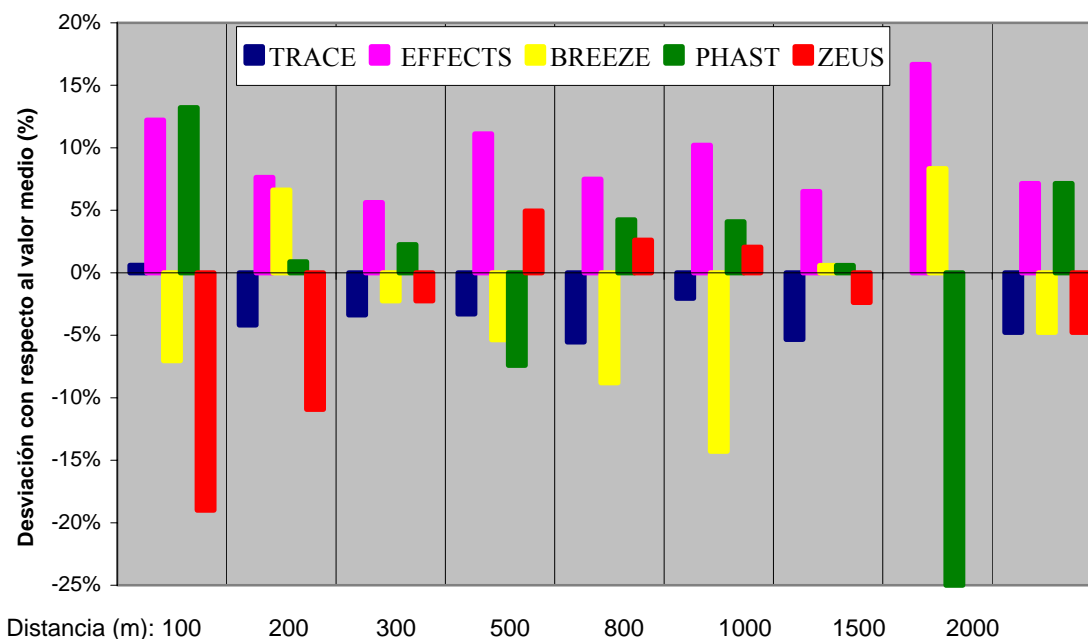


FIGURA 8.6. Desviación porcentual de los valores de impulso de cada programa con respecto al valor medio a cada distancia

Como se deduce de las figuras 8.4 a 8.6, los resultados obtenidos por todos los programas son similares, presentando en casi todos los casos desviaciones con respecto al valor medio inferiores al 15%. Para el programa ZEUS, dichas variaciones suelen ser inferiores al 10%.

8.3. ESTALLIDOS DE RECIPIENTES

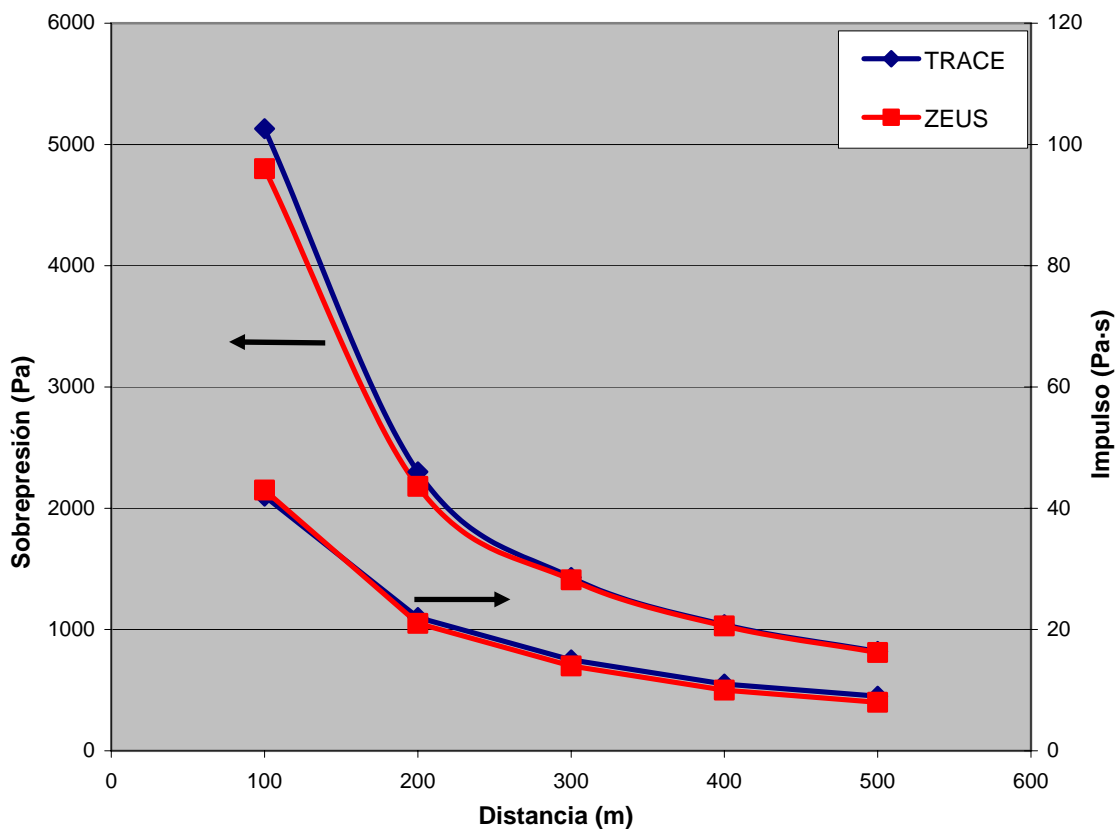
8.3.1. Recipiente con un gas permanente

En este apartado se realiza la simulación del estallido de un recipiente que contiene nitrógeno gas. Se analizan los resultados de sobrepresión e impulso a 100, 200, 300, 400 y 500 m. Los datos de entrada de TRACE y ZEUS, que son los únicos programas que permiten calcular este tipo de explosiones, se indican en la tabla 8.3.

TABLA 8.3. Datos de entrada correspondientes al estallido de un recipiente que contiene nitrógeno gas

INPUTS	PROGRAMAS INFORMÁTICOS	
	TRACE	ZEUS
Contenido del recipiente	Gas	Gas
Geometría del recipiente	Cilíndrico	Cilíndrico
Longitud del recipiente (m)	-	10
Diámetro del recipiente (m)	-	2.5
Volumen del recipiente (m ³)	57.3	-
Situación del recipiente (elevado o sobre el suelo)	Nivel del suelo	-
Altura del recipiente (m)	-	2.25
Temperatura del recipiente (K)	293	293
Presión de rotura (Pa)	18 10 ⁵	18 10 ⁵

Los resultados de sobrepresión e impulso obtenidos a las distancias citadas anteriormente se representan gráficamente en la figura 8.7.

**FIGURA 8.7.** Sobrepresión e impulso proporcionados por los TRACE y ZEUS para el estallido de un recipiente que contiene nitrógeno gas

Como se deduce de la figura 8.7, los resultados de sobrepresión e impulso obtenidos por ambos programas son muy similares.

8.3.2. Recipiente con un gas almacenado en equilibrio líquido-vapor

En este apartado se realiza la simulación del estallido de un recipiente que contiene amoníaco almacenado en condiciones de saturación. Se analizan los resultados de sobrepresión e impulso a 100, 200, 300, 400 y 500 m. Los datos de entrada de TRACE y ZEUS, que son los únicos programas que permiten calcular este tipo de explosiones, se indican en la tabla 8.4.

TABLA 8.4. Datos de entrada correspondientes al estallido de un recipiente que contiene una mezcla líquido-vapor de amoníaco

INPUTS	PROGRAMAS INFORMÁTICOS	
	TRACE	ZEUS
Contenido del recipiente	Mezcla líquido-vapor	Mezcla líquido-vapor
Geometría del recipiente	Cilíndrico	Cilíndrico
Longitud del recipiente (m)	-	10.25
Diámetro del recipiente (m)	-	3
Volumen del recipiente (m ³)	86.7	-
Situación del recipiente (elevado o sobre el suelo)	Nivel del suelo	-
Altura del recipiente sobre el suelo (m)	-	2
Temperatura del recipiente (K)	293	-
Presión de rotura (Pa)	25 10 ⁵	25 10 ⁵

Los resultados de sobrepresión e impulso obtenidos a las distancias anteriores se representan gráficamente en la figura 8.8.

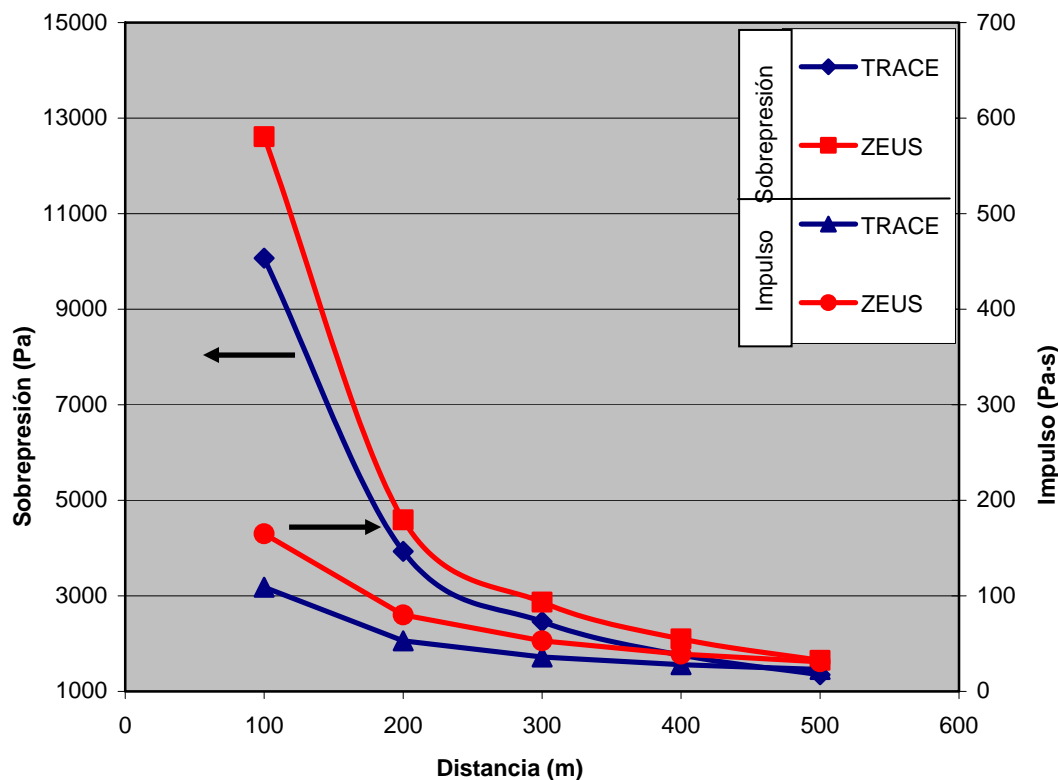


FIGURA 8.8. Sobrepresión e impulso proporcionados por los TRACE y ZEUS para el estallido de un recipiente que contiene una mezcla líquido-vapor de amoníaco

Como se observa en la figura 8.8, los resultados de sobrepresión e impulso obtenidos con ambos programas difieren más en este caso, con variaciones en torno al 20%. Estas diferencias se deben a la metodología empleada en la estimación de la energía liberada en el estallido. Mientras TRACE obtiene una energía de $1.94 \cdot 10^9$ J, ZEUS la estima en $3.5 \cdot 10^9$ J, valor que casi duplica al anterior (considerando en ambos el factor de cercanía al suelo). Dado que los dos programas calculan la energía liberada con los algoritmos del método de Baker, puede determinarse cuál de ellos la calcula con mayor precisión. Para ello se realiza el mismo cálculo de forma manual, utilizando datos termodinámicos y siguiendo la secuencia indicada en la etapa 2 del apartado I.4.1. El resultado obtenido es de $4.31 \cdot 10^9$ J (considerando el factor de cercanía al suelo), que se aproxima más al valor calculado por ZEUS.

8.4. CONCLUSIONES

Como se deduce de lo anterior, los resultados obtenidos con ZEUS son muy similares a los demás programas comerciales utilizados. Por otra parte, conviene destacar que ZEUS es el único de los programas evaluados que calcula detonaciones de sustancias explosivas, pirotécnicas o inestables, aspecto que resulta de interés, dados los elevados niveles de riesgo de las actividades industriales en las que se manipulan estos materiales. Por otro lado, ZEUS es el único programa, junto a TRACE, que calcula estallidos de recipiente, si bien TRACE no determina el alcance de los fragmentos.

En cuanto al cálculo de explosiones de nubes de vapor, conviene destacar que la mayoría de los programas ofrecen la posibilidad de utilizar varios métodos además del Multienergía, como el TNT equivalente o el de Baker-Strehlow. En cuanto al primero, en el apartado I.2.2 se indican las limitaciones del modelo TNT equivalente aplicado a la explosión de nubes de vapor. Por otro lado, los resultados que proporciona el segundo son muy similares a los de Multienergía, siempre que se seleccionen curvas de nivel equivalente. Sobre este aspecto, resulta interesante indicar que ZEUS es el único programa que permite seleccionar el nivel de la explosión bien de forma directa -el que considere oportuno el usuario- o calcularlo el programa siguiendo la metodología de las guías GAME y GAMES, publicadas por TNO, mientras que el resto de programas sólo permite la primera opción, aspecto que genera incertidumbres, ya que los resultados dependen significativamente de dicho parámetro.

Por otro lado, ZEUS proporciona la información más detallada de las consecuencias sobre personas y edificios, calculadas utilizando la metodología PROBIT, la más aceptada para esta finalidad. En cuanto a las ventajas que aporta ZEUS en relación a la gestión de emergencias, conviene destacar el cálculo de las Zonas de Planificación, siendo el único de los programas evaluados que lo efectúa.

CAPÍTULO 9. PLANTEAMIENTOS GENERALES Y CONCLUSIONES

Las explosiones son uno de los accidentes específicos de la industria que provocan mayores niveles de daño tanto por sus consecuencias directas como por la posibilidad de provocar efectos concatenados. Aunque la aplicación de medidas preventivas ha propiciado la disminución de las causas iniciadoras - fallos humanos o técnicos o incidencia de agentes externos-, no es posible eliminar totalmente la probabilidad de ocurrencia, por lo que los responsables de las instalaciones y las autoridades competentes deben evaluar las posibles consecuencias y elaborar planes de emergencia para mitigar los daños derivados de la materialización de estos accidentes.

La cantidad y características de las sustancias involucradas, las condiciones de almacenamiento y las circunstancias accidentales condicionan la intensidad y el nivel de consecuencias de las explosiones, habiéndose estudiado aquí tres tipologías: las detonaciones de explosivos, sustancias pirotécnicas o inestables, las explosiones de nubes de vapor y los estallidos de recipiente, recogiendo y adaptando las metodologías para determinar la sobrepresión, el impulso y el alcance de los proyectiles, lo que permite definir zonas de seguridad y planificación utilizando valores umbrales diferentes a los establecidos en la legislación actual.

Como resumen final se indican las principales conclusiones derivadas de esta Tesis Doctoral:

- Primera.-** Partiendo de los modelos de cálculo de la sobrepresión y del impulso más aceptados -TNT equivalente para la detonación de explosivos, sustancias pirotécnicas e inestables; Multienergía para la explosión de nubes de vapor y Baker para el estallido de recipientes- se han deducido las relaciones directas de la sobrepresión, el impulso y la distancia, denominadas *curvas características*, que permiten conocer directamente las magnitudes peligrosas (sobrepresión e impulso) de cualquier explosión a cualquier distancia, permitiendo conocer la evolución de las magnitudes implicadas en las explosiones. Representadas junto a las líneas de isorriesgo, permiten evaluar los daños provocados por la explosión a cualquier distancia, constituyendo un procedimiento sistemático para el análisis de consecuencias de estos accidentes.

- Segunda.-** El modelo de Multienergía no proporciona una relación entre el impulso y la distancia y dado que es indispensable para determinar las distancias de planificación, se define aquí una nueva variable denominada “impulso escalado” y se obtiene su relación con la

distancia escalada, proporcionando una información necesaria que complementa el modelo citado.

Tercera.- Se adapta el modelo de Baker, utilizado para determinar las magnitudes peligrosas de los estallidos de recipiente en función de la distancia al proceso inverso, esto es, para calcular las distancias a las que se producen determinados valores de sobrepresión o impulso. Para ello se determinan, mediante un proceso iterativo, los factores correctores de la sobrepresión y del impulso, necesarios para llevar a cabo dicho cálculo.

Cuarta.- Se analizan las características de los fragmentos formados en el estallido de recipientes industriales, calculando sus impulsos y energías cinéticas típicas y concluyendo que, dada su peligrosidad potencial, su alcance máximo debe ser tenido en cuenta para el establecimiento de la Zona de Intervención.

Quinta.- Se discuten los valores límite promulgados en la legislación española para establecer las Zonas de Intervención y Alerta, observándose que son conservadores para personas en exteriores, pero no resultan adecuadas para las situadas en el interior de las edificaciones.

Sexta.- Debido a lo anterior, se proponen valores límite basados en criterios de daño, de acuerdo con las definiciones que la Directriz Básica establece para las Zonas de Planificación, proponiendo los umbrales siguientes:

- A. *Para la Zona de Intervención en exteriores sin edificios:* sobrepresión de 22500 Pa, que provocaría la rotura timpánica del 1% de la población.
- B. *Para la Zona de Intervención en zonas edificadas:* sobrepresión de 6000 Pa o impulso de 110 Pa·s, que provocaría el 1% de daño estructural mayor en edificaciones.
- C. *Para la Zona de Alerta:* sobrepresión de 1300 Pa o impulso de 40 Pa·s, que provocaría el 10% de daño estructural menor en edificaciones.

Séptima.- Dado que los niveles de daño anteriores (exceptuando el utilizado para delimitar la Zona de Intervención en exteriores sin edificios) están definidos por umbrales de sobrepresión y de impulso, se propone una metodología basada en las *curvas características* para

seleccionar el umbral a partir del cual debe calcularse la distancia que defina la Zona de Planificación, en función de la masa de TNT equivalente o de la energía de la explosión involucrada en la explosión.

Octava.- Se analizan los valores límite y otros criterios relativos a las explosiones accidentales industriales en algunos países de nuestro entorno, observándose que los aquí propuestos presentan mayor coherencia y aplicabilidad que los analizados.

Novena.- Se seleccionan y estudian 17 accidentes industriales que han ocasionado graves consecuencias, comparando los daños referenciados en la bibliografía con las Zonas de Planificación propuestas en esta Memoria, concluyendo que ésta proporciona un adecuado nivel de protección a la población.

Décima.- Se ha desarrollado un programa informático que permite determinar la sobrepresión, el impulso, el alcance máximo de los fragmentos, los principales daños a personas y edificios y las Zonas de Planificación para los tres tipos de explosiones estudiadas.

PERSPECTIVAS DE INVESTIGACIÓN

Dentro del contexto de la prevención de riesgos y la protección frente a los accidentes graves que pueden manifestarse en la industria química y afines es patente que el desarrollo de muchos aspectos relacionados con la docencia e investigación en estos ámbitos no ha tenido adecuada repercusión en las actividades investigadoras de la Universidad española, siendo muy escasos los grupos de investigación relacionados con estas materias. Quizás, una de las razones que explican esta situación en el ámbito concreto de la prevención y protección ante accidentes graves es la dificultad técnica y económica que conlleva la reproducción de escenarios adecuados para determinar con rigor las situaciones que pueden plantearse. Así, la evaluación de consecuencias en explosiones de gran magnitud se realiza con experimentación a pequeña escala, cuya extrapolación conduce a elevadas incertidumbres, cuestión que subyace a lo largo de esta Memoria.

Nuestra intención es continuar la investigación en este campo dado que, a nuestro juicio, quedan numerosos aspectos que interesaría abordar, entre ellos:

1. Aplicar metodologías similares a las aquí expuestas para otros tipos de explosiones como, por ejemplo, las de polvo y aerosoles.
2. Estudiar la influencia de la compactación y las condiciones de almacenamiento de los explosivos sólidos sobre la onda de presión generada en su detonación.
3. Estudiar el alcance y la distribución de los fragmentos procedentes de silos o estructuras en cuyo interior se produce la detonación de materiales explosivos.
4. Obtener información experimental relacionada con la formación y el alcance de los fragmentos generados en la explosión de recipientes industriales, con el objeto de mejorar las metodologías de cálculo actuales.
5. Estudiar el comportamiento de materiales y equipos frente a las explosiones externas, con el objeto de predecir posibles *efectos dominó*.

Pero no basta con nuestro interés, la continuidad dependerá del apoyo que puedan prestar los organismos o entidades interesadas.

ANEXO I. MODELOS DE CÁLCULO DE LA SOBREPRESIÓN, DEL IMPULSO Y DEL ALCANCE DE LOS FRAGMENTOS EN LAS EXPLOSIONES INDUSTRIALES ACCIDENTALES

La sobrepresión y el impulso asociados a las ondas generadas en las explosiones son las variables primarias a tener en cuenta para determinar los daños ocasionados por estos accidentes. El alcance de los fragmentos formados por el estallido de recipientes necesita un tratamiento de cálculo diferente, que se expone en el apartado I.4.2.

I.1 PERSPECTIVA GENERAL DE LOS MÉTODOS MÁS UTILIZADOS PARA EL CÁLCULO DE LAS EXPLOSIONES

Aunque las metodologías de cálculo presentan diferencias, como consecuencia de los distintos orígenes y condiciones de las explosiones, la mayoría de ellas sigue una secuencia similar, que consiste en:

- Determinar la energía total formada y la parte que interviene en la formación de la onda de presión o un parámetro proporcional a ésta.
- Calcular la “distancia escalada” que depende de la energía de la explosión y de la distancia al origen del accidente.
- Obtener la sobrepresión y el impulso a partir de relaciones empíricas o semi-empíricas de estos parámetros con la “distancia escalada”, diferentes en cada método.

Siguiendo este esquema se exponen aquí algunos procedimientos de cálculo publicados, pero se detallan especialmente los más utilizados para cada caso que, a su vez, son los recomendados para determinar las Zonas de Planificación ante explosiones típicas industriales, no nucleares.

I.1.1. Detonación de sustancias explosivas

Para el cálculo de este tipo de explosiones, el método más utilizado es el del **TNT equivalente**, consistente en calcular los efectos de la detonación de cualquier sustancia explosiva comparando la energía generada en la misma con la que liberaría una cantidad equivalente de TNT que produjera los mismos efectos (*Lees, 1996*). Este método se describe en el apartado I.2.

I.1.2. Explosión de nubes de vapor

Los métodos para calcular de este tipo de explosiones pueden agruparse en las tres categorías indicadas en la tabla I.1, que se comentan a continuación.

TABLA I.1. Clasificación de los métodos de cálculo de las explosiones de nube de vapor

Categoría	Ejemplos
Métodos basados en el TNT	TNT equivalente, British Gas VCE
Métodos basados en relaciones características de las explosiones	Baker-Strehlow, Evaluación del Área Congestionada, Multienergía
Métodos fluidodinámicos	EXSIM, FLACS, AutoReaGas

I.1.2.1. Métodos basados en el TNT

Aunque el **método de TNT equivalente** resulta fácil de aplicar a las explosiones de nubes no proporciona buenos resultados (ver apartado I.2.2).

El **método British Gas VCE** utiliza los criterios básicos del TNT equivalente para estimar la sobrepresión máxima y el impulso generados en las explosiones de nubes de **gas natural**, apoyándose en los datos obtenidos en experiencias controladas con dicho gas. Sólo considera la parte de la nube que forma una mezcla estequiométrica con el aire y que está en una región fuertemente obstruida, dado que los efectos de la explosión del resto de la nube son prácticamente irrelevantes. El cálculo de la sobrepresión parte del supuesto de que en el centro de la explosión se alcanza siempre 4 bares (que es la observada en los ensayos) y utiliza la siguiente expresión (*IChemE, 1994*):

$$W_{TNT} = 2 W_{congested} \quad (\text{I.1})$$

Siendo W_{TNT} la masa equivalente de TNT de la nube y $W_{congested}$ la masa de gas que participa con mayor efecto en la explosión, tal y como se ha comentado anteriormente.

Debido a su limitado ámbito de aplicación, este método sólo resulta fiable en condiciones análogas a los ensayos, por lo que su uso para otros escenarios puede conducir a resultados inapropiados.

I.1.2.2. Métodos basados en relaciones características de las explosiones

El **método Baker-Strehlow** utiliza las correlaciones encontradas entre la sobrepresión escalada $-P'$ - y la distancia escalada $-R'$ - (figura I.1), parámetros adimensionales cuyas expresiones son las siguientes:

$$P' = \frac{P_s}{P_0} \quad (I.2)$$

$$R' = \frac{z}{\left(\frac{E_{exp}}{P_0}\right)^{1/3}} \quad (I.3)$$

donde z es la distancia al origen de la explosión (metros), y E_{exp} es la energía liberada (Julios), cuyo cálculo se realiza según los criterios establecidos en el método Multienergía, descrito en el apartado I.3.

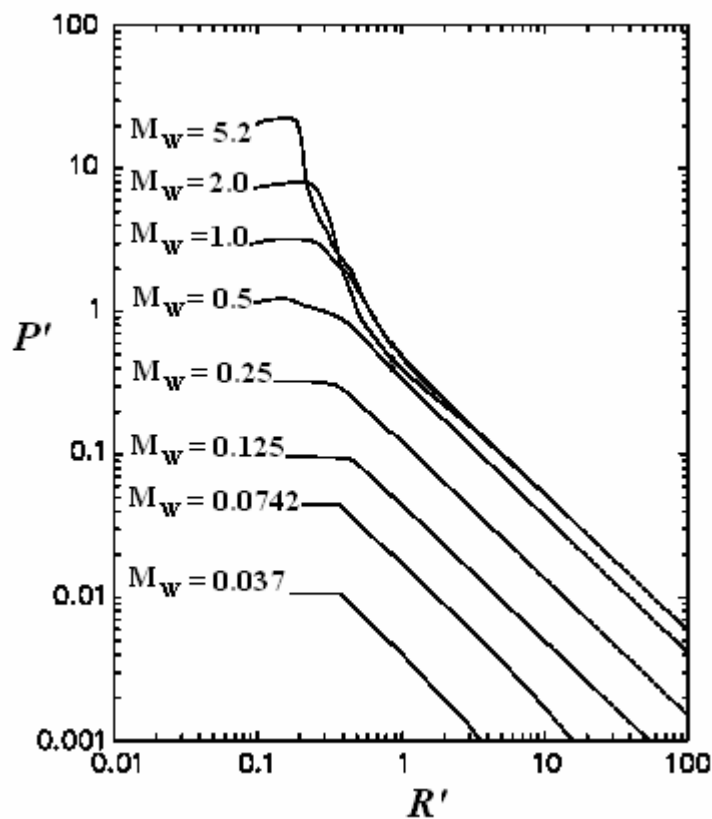


FIGURA I.1. Presión escalada frente a la distancia escalada para diferentes velocidades del frente de llama, expresadas en números de Mach (M_w), según el modelo de Baker-Strehlow (Baker et al., 1996).

Como se observa en la figura I.1, las relaciones $P'-R'$ dependen de la velocidad del frente de llama, expresada como número de Mach (M_w) que, a su vez, depende de los parámetros siguientes: nivel de reactividad del combustible, grado de confinamiento de la nube y grado de obstrucción provocados por los elementos cubiertos por la nube.

Se definen tres niveles de reactividad del combustible: bajo, medio y alto. El metano y el monóxido de carbono son los únicos gases considerados de baja reactividad. Los combustibles de alta reactividad son: hidrógeno, acetileno, óxido de etileno, óxido de propileno y etileno. Cualquier otro hidrocarburo gaseoso se considera de reactividad media.

Los tres grados de confinamiento, 1D, 2D y 3D, indican las posibles dimensiones del espacio disponibles para la expansión de la onda. El grado 3D es el de una expansión sin confinamiento, esto es, una explosión en terreno libre. El grado 2D denota confinamiento parcial como, por ejemplo, un techo que permite la expansión en sólo dos dimensiones del espacio. El confinamiento 1D corresponde a la situación en que la explosión se expande en una dirección, por ejemplo, debido a la presencia de dos paredes y un techo.

También se consideran tres grados de obstrucción o congestión. Un grado bajo corresponde a una zona con pocos obstáculos y muy separados. En el extremo opuesto, uno alto es aquél donde hay muchos obstáculos con pocos espacios libres entre ellos. Entre ambos está situado el grado de congestión medio.

Las combinaciones de estos parámetros establecidos en la tabla I.2 permiten obtener en cada caso la velocidad del frente de llama, expresada en número de Mach (Baker et al., 1996).

TABLA I.2. Velocidad del frente de llama en número de Mach, que es el parámetro de la figura I.1, para fuentes de ignición de baja intensidad

Expansión de la llama (confinamiento)	Reactividad del combustible	Número de Mach (M_w)		
		Densidad de obstáculos (congestión)		
		Alta	Media	Baja
1D	Alta	5.2	5.2	5.2
	Media	2.27	1.77	1.03
	Baja	2.27	1.03	0.294

2D	Alta	1.77	1.03	0.588
	Media	1.24	0.662	0.118
	Baja	0.662	0.471	0.079
3D	Alta	0.588	0.153	0.071
	Media	0.206	0.1	0.037
	Baja	0.147	0.1	0.037

El segundo método basado en relaciones características de las explosiones es el denominado **Método de Evaluación del Área Congestionada (Congestion Assessment Method)** que utiliza correlaciones de parámetros característicos de las explosiones con la distancia, y determina la sobrepresión mediante expresiones que dependen del tipo de confinamiento de la nube (*Fitzgerald, G., 2001*). El método se considera fiable y conservador en sus predicciones, pero necesita parametrizar algunas características geométricas del lugar y propiedades de la nube, entre ellas:

- Las dimensiones de la región congestionada.
- El número de obstáculos en todas las direcciones de avance del frente de llama.
- Un 'factor de complejidad' (comprendido entre 1 y 4) que es función del nivel de homogeneidad geométrica y de la uniformidad de la disposición de los objetos presentes en la zona congestionada.
- El 'factor de combustible' y la 'razón de expansión'. Estos factores se relacionan con la reactividad del combustible y la expansión de los gases tras la combustión.

No es muy utilizado por las dificultades de conocer o calcular los parámetros anteriores.

El tercer método denominado de **Multienergía** es el más utilizado, describiéndose ampliamente en el apartado I.3.

1.1.2.3. Métodos fluidodinámicos

El fenómeno de la generación y propagación de la onda de presión puede ser modelizado resolviendo las ecuaciones generales de balance de materia, energía y cantidad de movimiento entre los límites pertinentes.

El procedimiento general de resolución consiste en aplicar las ecuaciones citadas a subdivisiones del espacio geométrico, lo que permite introducir la geometría real de la instalación en la que se desea simular la explosión.

Los resultados así obtenidos son bastante precisos, tal y como se ha demostrado al compararlos con los que proceden de experimentos y de casos

reales. Estos métodos son especialmente apropiados para calcular los valores de las magnitudes peligrosas de las explosiones en zonas cercanas al origen. (*Mercx et al., 1995*) pero, dada la dificultad de resolución de las ecuaciones a que dan lugar, están implementados en programas informáticos especiales. El primero de ellos, denominado **EXSIM**, fue desarrollado por Telemark Technological R&D Centre (Tel-Tek) en Noruega y por Shell Global Solutions en el Reino Unido. El segundo se conoce como **FLACS** (FLame ACceleration Simulator), y ha sido elaborado por GEXCON. Finalmente, el **AutoReaGas** ha sido desarrollado por Century Dynamics Ltd. y TNO (The Netherlands Organization).

La utilización de estos programas para la planificación exterior de emergencias presentaría dificultades, ya que aunque su principal ventaja radica en la exactitud con que predicen los parámetros peligrosos de las explosiones en posiciones cercanas al origen, necesitan una información muy detallada del entorno de la explosión y no aportan mejoras significativas en los resultados para posiciones más alejadas.

I.1.3. Estallido de recipientes

Básicamente, se distinguen dos grupos de modelos aplicables al cálculo de los parámetros característicos de las explosiones de recipientes:

- Los **basados en la fluidodinámica**, que parten de las ecuaciones de conservación, que deben ser resueltas con métodos numéricos. Estos procedimientos, aunque rigurosos, tienen el inconveniente de necesitar información sobre numerosos parámetros, a veces no disponible.
- Los **métodos generalizados**, basados en consideraciones termodinámicas, tratan de calcular la energía que genera la onda de presión. Dentro de este grupo, los más utilizados son el **método del TNT equivalente** y el de **Baker**. El primero presenta los mismos inconvenientes que su aplicación a las nubes, principalmente la incertidumbre de la eficiencia de la explosión.

Además de los parámetros característicos de la onda de presión, en el estallido de recipientes se debe calcular también el alcance de los fragmentos generados en la explosión. En el apartado I.4.2 se describe la metodología más aceptada para evaluar dicha distancia en función del tipo de estallido, de la geometría del recipiente y de las condiciones de almacenamiento en el momento de la explosión.

I.2. MÉTODO DEL TNT EQUIVALENTE

El TNT es un explosivo convencional muy utilizado y los efectos provocados han sido muy estudiados, de manera que se conoce con suficiente aproximación la relación entre la masa de TNT que explota y la sobrepresión e impulso de la onda generada en función de la distancia al origen de la explosión. Como se comentó anteriormente, el método del TNT equivalente permite calcular los efectos de cualquier sustancia explosiva por comparación de la energía generada con la que liberaría una cantidad equivalente de TNT que produjera los mismos efectos (*Lees, 1996*).

La relación entre la energía liberada (E_{exp}), sea cual fuere su origen (explosivo, nube o depósito), y la masa de TNT equivalente (W_{TNT} , en kg) se establece mediante la siguiente relación (*IChemE, 1994*):

$$W_{TNT} = \alpha \frac{E_{exp}}{4.6 \cdot 10^6} \quad (I.4)$$

Siendo α el factor de eficiencia de la explosión, cuya estimación constituye la mayor dificultad e incertidumbre del método. Asimismo, $4.6 \cdot 10^6$ J/kg es la energía liberada en la explosión de 1 kg de TNT.

Una vez conocida la masa de TNT equivalente se determina la distancia escalada, z' , mediante:

$$z' = \frac{z}{W_{TNT}^{1/3}} \quad (\text{m/kg}^{1/3}) \quad (I.5)$$

donde z es la distancia desde el origen de la explosión al punto donde se desea estimar la sobrepresión (ver figura I.2) o el impulso (ver figura I.3). En este último caso se obtiene el impulso escalado de TNT, i_{TNT} , cuya expresión es la siguiente:

$$i_{TNT} = \frac{i}{W_{TNT}^{1/3}} \quad (\text{Pa}\cdot\text{s/kg}^{1/3}) \quad (I.6)$$

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

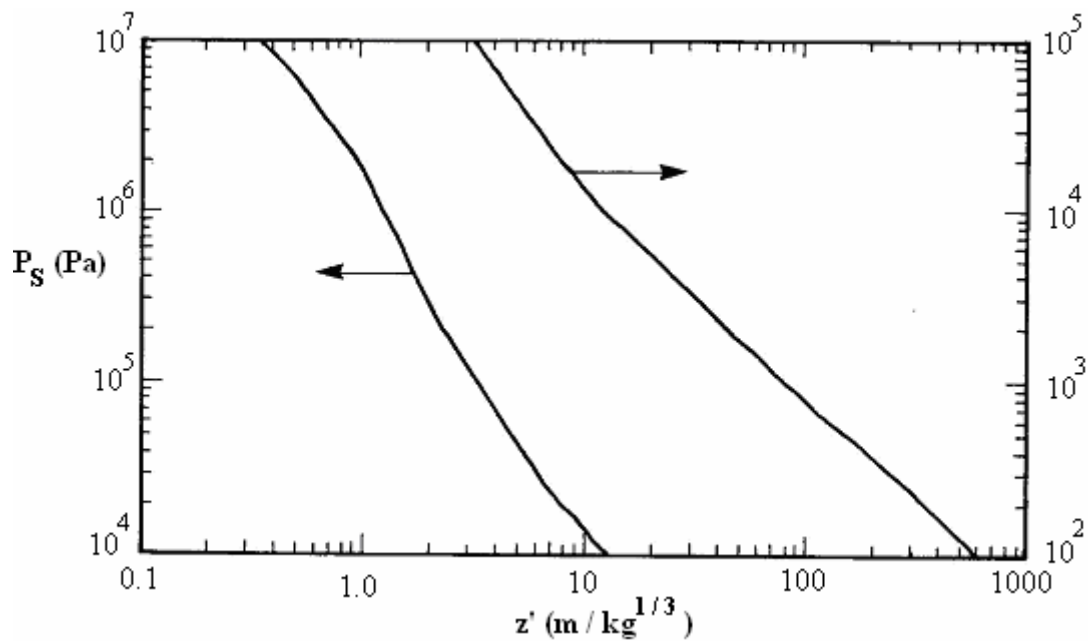


FIGURA I.2. Sobrepresión de la onda en función de la distancia escalada para el método del TNT equivalente (IChemE, 1994).

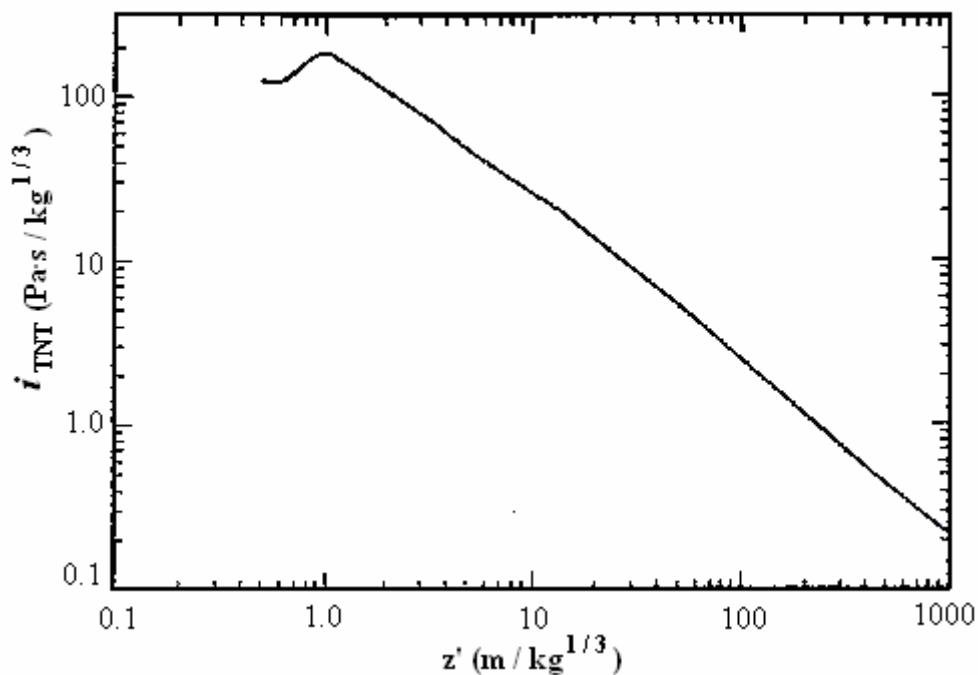


FIGURA I.3. Impulso escalado en función de la distancia escalada para el método del TNT equivalente (IChemE, 1994).

A continuación se indica la secuencia del método para sustancias explosivas, nubes de vapor y estallidos de recipientes. No obstante, la mejor aplicación es la primera de las citadas, tal como se indica en el apartado I.2.2.

I.2.1. Descripción de la metodología de cálculo

A continuación se expone la metodología de cálculo que permite determinar la sobrepresión e impulso de la onda en función de la distancia al centro de la explosión, o a la inversa, esto es, encontrar la distancia a la cual se produce un determinado valor de la sobrepresión o del impulso. La figura I.4 indica la secuencia de aplicación de este método.

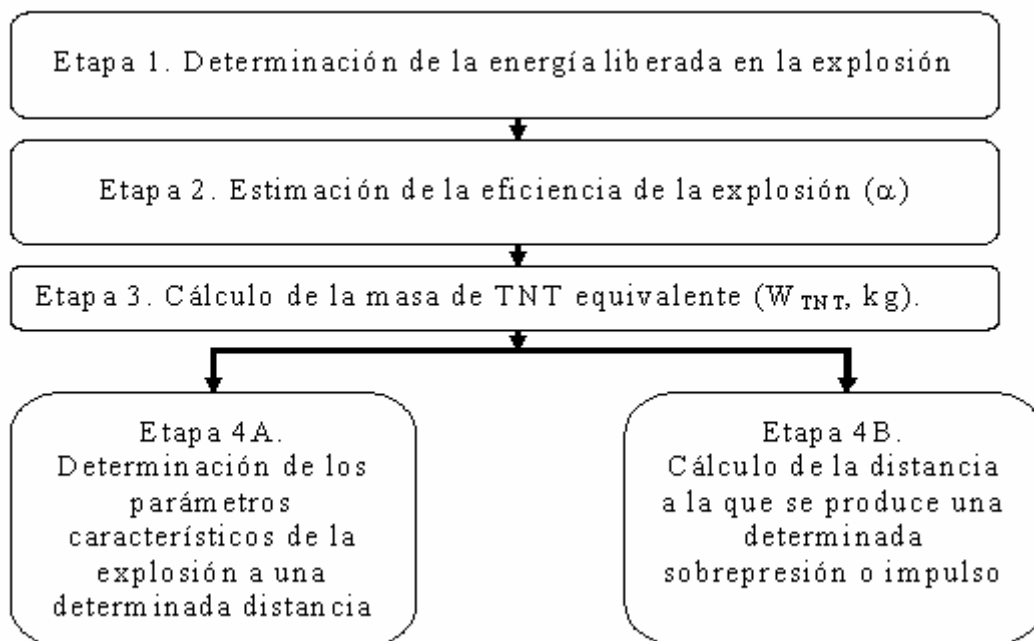


FIGURA I.4. Secuencia del método del TNT equivalente

Etapa 1. Determinación de la energía liberada en la explosión

Caso 1.1: Sustancias explosivas.

La energía liberada por una sustancia explosiva es:

$$E_{\text{exp}} = W_{\text{exp}} \Delta H_{\text{exp}} \quad (\text{I.7})$$

Siendo W_{exp} la masa de sustancia implicada en la explosión (kg) y ΔH_{exp} la entalpía de la reacción de explosión (J/kg).

Caso 1.2: Nubes de vapor.

Previamente debe determinarse la cantidad de combustible que se encuentra entre los límites de inflamabilidad (W_c , kg), mediante un adecuado programa que modelice la dispersión de la nube en función del escenario y de las características meteorológicas pertinentes. Con este parámetro y la entalpía de combustión (ΔH_c , J/kg) se calcula la energía liberada (E_{exp}):

$$E_{exp} = W_c \Delta H_c \quad (\text{I.8})$$

Caso 1.3: Estallidos de recipientes.

La energía liberada en la explosión depende de las condiciones de almacenamiento de la sustancia que produce la explosión y de las causas que la desencadenan. En el apartado I.4 se establecen diferentes procedimientos de cálculo según las condiciones específicas de cada caso.

Etap 2. Estimación de la eficiencia de la explosión (α)

Caso 2.1. Sustancias explosivas.

Dada la naturaleza reactiva de estas sustancias, se acepta que el factor de eficiencia es máximo, esto es, la unidad (*ICChemE, 1994*).

Caso 2.2. Nubes de vapor.

En este caso, la eficiencia de la explosión es baja. La mayor parte de la energía liberada se disipa en forma de calor, invirtiéndose sólo una pequeña fracción en generar la onda de presión.

Van den Berg y Lannoy (1993) analizaron 23 accidentes de nubes de vapor de hidrocarburos, observando que α tenía valores comprendidos entre $2 \cdot 10^{-4}$ y 0.159 con un valor medio de 0.03. En el 97% de los casos α resultó ser menor o igual a 0.1 y en el 60% la media fue de 0.04. En la tabla I.3 se recogen los valores propuestos por otros autores.

TABLA I.3. Valores propuestos para la eficiencia de la explosión (α) para nubes de vapor (*Casal et al., 1999*).

Autor	α
<i>Cugan (1979)</i>	0.1
<i>Health and Safety Comission, Advisory Committee on Major Hazards (1979)</i>	0.042
<i>Brasie y Simpson (1968)</i>	0.03
<i>Davenport (1977)</i>	0.02

La eficiencia de la explosión depende de ciertas características, siendo tanto mayor conforme:

- Aumente el grado de obstrucción o confinamiento parcial de la nube.
- Aumente la energía de la fuente de ignición que provoca la explosión.
- Sea mejor la homogeneidad de la mezcla y más se aproxime a la relación estequiométrica.
- Sea mayor la reactividad de la sustancia involucrada.

IChemE (1994) recomienda tomar, como criterio general, los valores indicados en la tabla I.4.

TABLA I.4. Valores de la eficiencia de explosión para nubes de diferentes sustancias según *IChemE (1994)*

Sustancias	α
Poco reactivas (como hidrocarburos o cloroetileno)	0.04
Medianamente reactivas (como óxido de propileno)	0.06
Muy reactivas (como óxido de etileno)	0.1

Caso 2.3. Estallido de recipientes.

La energía liberada cuando colapsa un recipiente que contiene un gas a presión se reparte entre la energía de rotura del recipiente, la onda de presión y la formación de proyectiles, siendo muy difícil cuantificar dicho reparto. Para recipientes que contienen gases permanentes no licuados, se estima que del 40 al 70% de la energía liberada se convierte en energía de presión; *IChemE (1994)* sugiere utilizar como valor único el 50%.

Etapa 3. Cálculo de la masa de TNT equivalente (W_{TNT} , kg).

Conocida la energía de la explosión (E_{exp}) y el factor de eficiencia (α), se obtiene la masa equivalente de TNT (W_{TNT}), mediante:

$$W_{TNT} = \alpha \frac{E_{exp}}{4.6 \cdot 10^6} \quad (1.9)$$

Para los explosivos habituales suele conocerse directamente la masa de TNT equivalente por unidad de masa de producto ($W_{TNT} / W_{exp} \text{ explosivo}$) -ver tabla I.5 (*IChemE, 1994* y *Conrath et al., 1999*)-. En este caso, la masa de TNT equivalente se calcula mediante:

$$W_{TNT} = W_{\text{exp}} \left(\frac{W_{TNT}}{W_{\text{exp}}} \right)_{\text{explosivo}} \quad (\text{I.10})$$

En ocasiones (sobre todo para los explosivos convencionales) se utilizan equivalencias máscas diferentes para el cálculo de la sobrepresión y del impulso. Para el objetivo de este trabajo se toma un valor medio, puesto que las diferencias en las Zonas de Planificación calculadas con unas u otras no son significativas (menores al 4% para los explosivos con las equivalencias que más difieren).

TABLA I.5. Masa de TNT por unidad de masa de diferentes explosivos o sustancias inestables para el cálculo de la sobrepresión o del impulso

Explosivo	Equivalencia máscas con el TNT -Sobrepresión- $\left(\frac{W_{TNT}}{W_{\text{exp}}} \right)_{\text{explosivo}, Ps}$	Equivalencia máscas con el TNT -Impulso- $\left(\frac{W_{TNT}}{W_{\text{exp}}} \right)_{\text{explosivo}, i}$
Nitroglicerina	1.69	1.69
PETN	1.77	1.77
Ácido Pícrico	1.06	1.06
RDX	1.57	1.57
Trinitrobenceno	1.11	1.11
2,4-Dinitrotolueno	0.77	0.77
Nitrato amónico	0.56	0.56
Peróxido de ciclohexanona	0.19	0.19
Clorato sódico	0.15	0.15
Nitrometano	1.34	1.34
Composición A-3	1.09	1.076
Composición C-4	1.37	1.19
Ciclotol (70/30)	1.14	1.09
HBX-1	1.17	1.16
HBX-3	1.14	0.97
H-6	1.38	1.15
Minol II	1.20	1.11
Pentolita	1.38	1.14
Picratol	0.90	0.93
TNETB	1.36	1.10
Tritonal	1.07	0.96

Nota 1: En algunos explosivos se utilizan equivalencias diferentes en función del nivel de sobrepresión. Las indicadas en la tabla corresponden a los niveles típicos de las Zonas de Intervención y Alerta. Si se desea mayor

información, puede consultarse las referencias *IChemE (1994)* y *Conrath et al., (1999)*.

Conviene resaltar que el nitrato amónico, muy utilizado en la formulación de fertilizantes y que ha provocado explosiones de graves consecuencias, tiene una equivalencia másica del 56% con relación al TNT.

A continuación, en la etapa 4A, se calcula la sobrepresión y el impulso a una determinada distancia del origen de la explosión. En el caso inverso, esto es, para el cálculo de la distancia a la que se produce un determinado valor de la sobrepresión o del impulso (como es el cálculo de las Zonas de Planificación), debe seguirse en la etapa 4B.

Etapa 4A. Determinación de los parámetros característicos de la explosión a una determinada distancia

Cálculo de la distancia escalada (z'):

Para cada punto alejado una distancia z del origen de la explosión se determina la denominada distancia escalada, mediante la ecuación I.5, antes citada:

$$z' = \frac{z}{W_{TNT}^{1/3}} \quad (I.5)$$

Parámetros de la onda:

Para cada valor de z' se determina la sobrepresión P_s (figura I.2) y el impulso escalado i_{TNT} (figura I.3) El impulso mecánico (i , Pa·s) se obtiene a partir de la ecuación I.6:

$$i = i_{TNT} W_{TNT}^{1/3} \quad (I.11)$$

Etapa 4B. Cálculo de la distancia a la que se produce una determinada sobrepresión o impulso

Para el cálculo de la distancia correspondiente a un determinado valor de sobrepresión o impulso se debe aplicar el método de TNT equivalente de forma inversa.

Impulso escalado:

A partir del impulso deseado se obtiene el correspondiente valor escalado, i_{TNT} , utilizando la ecuación I.6.

Obtención de la distancia escalada (z'):

A partir de la sobrepresión estática deseada o del impulso escalado se obtiene la distancia escalada mediante las figuras I.2 ó I.3.

Distancia (z , metros):

Una vez obtenida la distancia escalada, z' , se transforma en la distancia z (en metros) a partir de la ecuación I.5.

I.2.2. Aplicabilidad del método del TNT equivalente

Por la propia naturaleza del método, que compara la energía liberada en una explosión con los efectos equivalentes del TNT, es especialmente aplicable a sustancias explosivas o muy inestables.

Mayor incertidumbre tiene su aplicación a las nubes de vapor y a la rotura de recipientes a presión. En el primer caso, la estimación de la eficiencia de la explosión presenta grandes dificultades, y supone por ello la mayor fuente de incertidumbre del procedimiento. Asimismo, cabe destacar que el TNT da lugar a explosiones detonantes, cuyo perfil difiere considerablemente de las deflagrantes, que son las que suelen originar las nubes de vapor. Estas diferencias, más pronunciadas en las zonas cercanas al origen de la explosión, provocan notables desviaciones de la sobrepresión y del impulso. En cuanto al estallido de recipientes, la incertidumbre del factor de eficiencia desaconseja la utilización de este método.

I.3. MÉTODO MULTIENERGÍA

Este método tiene en cuenta que, cuando se inflama una nube de vapor, las mayores sobrepresiones se generan en regiones congestionadas o confinadas de la nube. Se supone que en cada región obstruida de la nube ocurre una subexplosión, y la explosión total se modeliza como la que produciría un volumen igual a la suma de los volúmenes de cada una de las zonas obstruidas donde se generan las mencionadas subexplosiones.

Se han propuesto correlaciones para determinar la sobrepresión estática, la presión dinámica y la duración de la fase positiva de la onda, en función de la distancia escalada. Estas correlaciones han sido establecidas a través de modelos fluidodinámicos de nubes con una energía de 3.5 MJ/m^3 , que es el calor de combustión de la mayoría de los hidrocarburos en mezcla estequiométrica con el aire. Se supone que la nube es semiesférica (de radio R_0), y de concentración estequiométrica y homogénea. Los resultados han sido contrastados experimentalmente con explosiones controladas y accidentales.

En las figuras I.5 a I.7, donde se representan la sobrepresión estática (P'), dinámica (Q') y la duración de la fase positiva (t'_p) escaladas frente a la distancia escalada (R'), se establecen niveles de 1 a 10. El nivel 1 corresponde a una deflagración muy débil, y el 10 a la detonación más intensa. Los demás niveles definen situaciones intermedias.

Los parámetros adimensionales R' y P' utilizados en las figuras I.5 a I.7 han sido definidos anteriormente (ecuaciones I.2 y I.3). Los parámetros t'_p (adimensional) y Q' (adimensional), se determinan con las expresiones siguientes:

$$t'_p = \frac{t_p c_0}{\left(\frac{E_{\text{exp}}}{P_0}\right)^{1/3}} \quad (\text{I.12})$$

$$Q' = \frac{Q}{P_0} \quad (\text{I.13})$$

donde c_0 es la velocidad del sonido en el aire (340 m/s).

Para operar con las figuras I.5 a I.7 es necesario estimar la composición y el volumen de la nube y conocer la disposición de los elementos y estructuras capaces de configurar obstrucciones y/o confinamiento de la nube. Con esos datos puede calcularse la energía de la explosión.

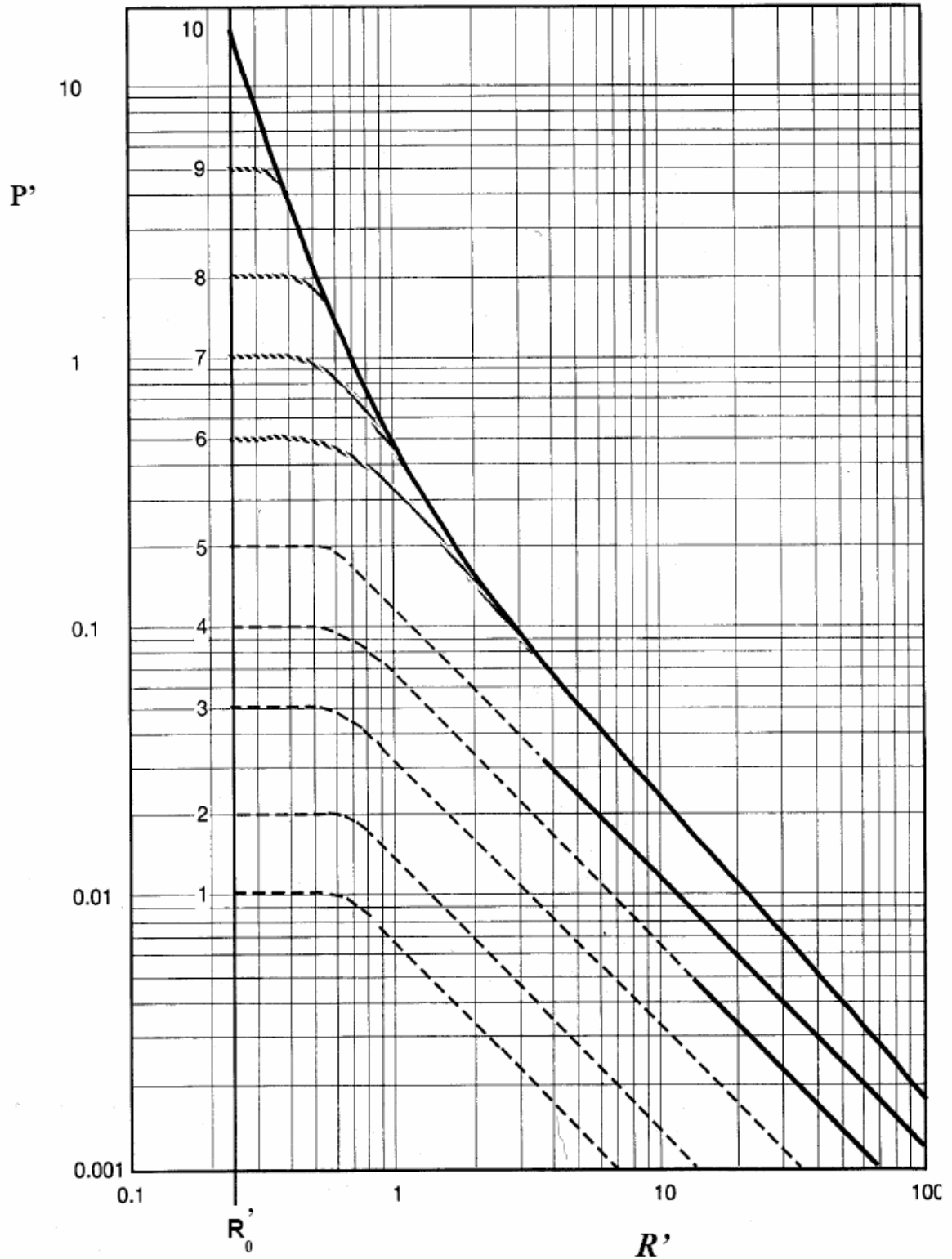


FIGURA I.5. Sobrepresión estática escalada (P') frente a distancia escalada (R') de la onda formada en la explosión de nubes para el método de Multienergía

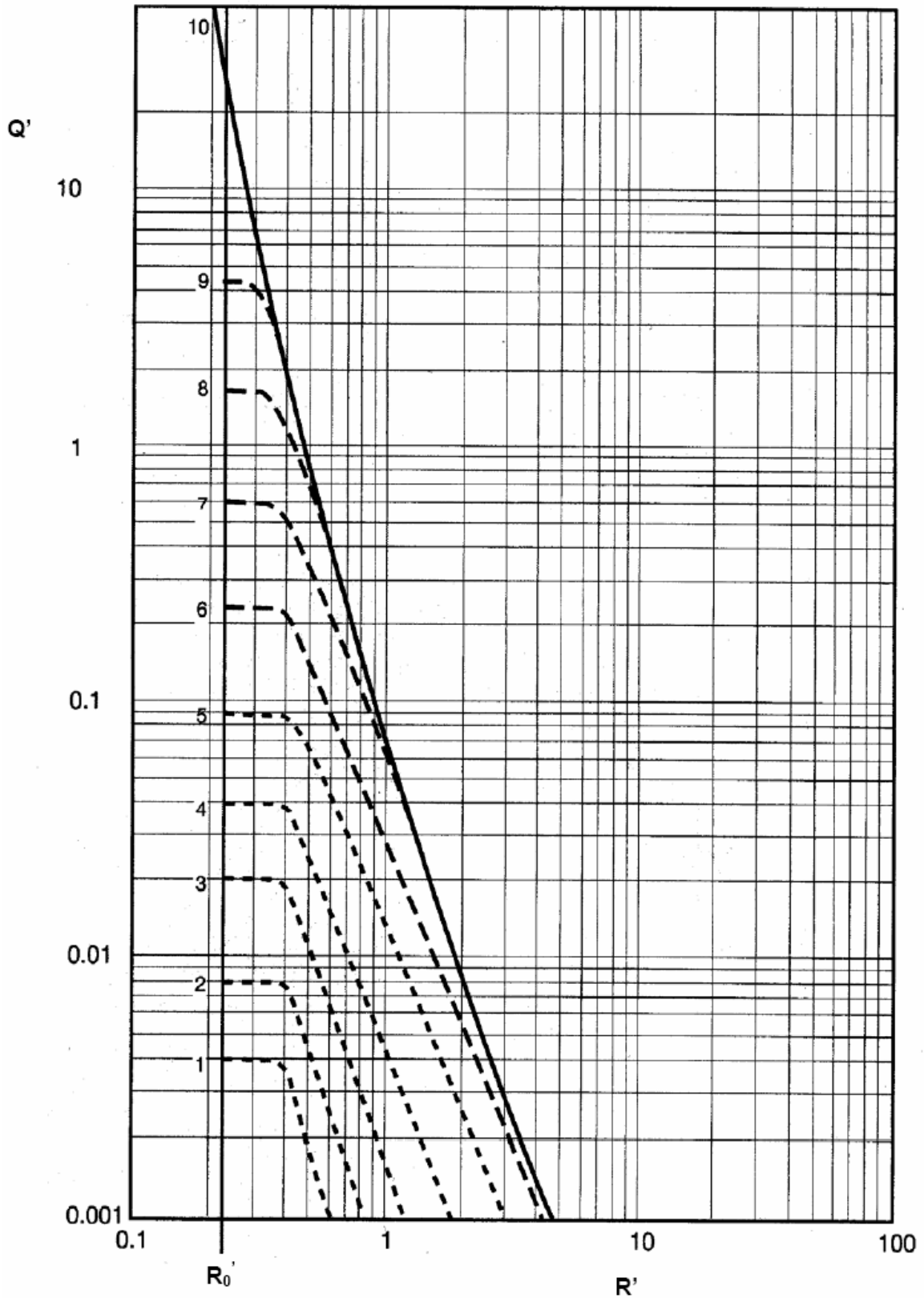


FIGURA I.6. Sobrepresión dinámica escalada (Q') frente a la distancia escalada (R') de la onda formada en la explosión de nubes para el método de Multienergía

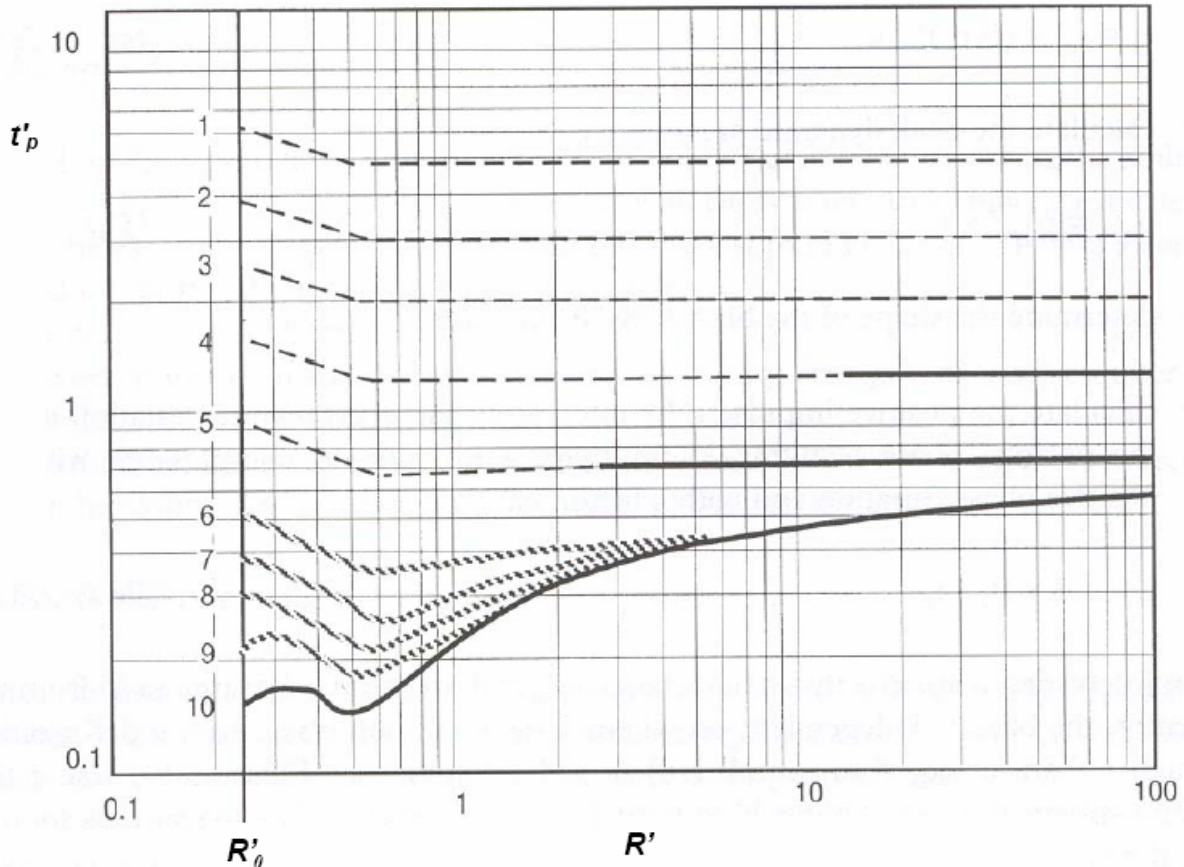


FIGURA I.7. Duración escalada de la fase positiva (t'_p) frente a la distancia escalada (R') de la onda formada en la explosión de nubes para el método de Multienergía

I.3.1. Criterios para seleccionar el nivel de explosión apropiado

La principal dificultad del procedimiento radica en la selección del nivel de explosión apropiado para cada caso, dada la diversidad de parámetros que influyen en el proceso. La intensidad de la explosión depende de la masa y reactividad del combustible, de la congestión y/o confinamiento de la nube, de la intensidad de la fuente de ignición y de parámetros relacionados con la geometría de la zona obstruida.

Los criterios aportados por algunos autores pueden constituir una ayuda para seleccionar el nivel adecuado. El criterio más simple es el propuesto por TNO en el caso de ausencia de información sobre los factores mencionados anteriormente, consistente en seleccionar el nivel 7 cuando la explosión se produzca en una región obstruida, y el 3 en una zona sin obstáculos. Dependiendo de la cantidad de información disponible y del grado de precisión

requerido se pueden seguir otros criterios, destacando los de *Kinsella (1993)* y *Baker (1996)*, recomendables cuando sólo se dispone de información cualitativa, y especialmente las de las guías *GAME (1998)* y *GAMES (1998)*, que son las que se utilizan en este trabajo, en los casos que se disponga de información más amplia.

Kinsella (1993) tiene en cuenta el nivel de obstrucción de la nube, clasificándolo en alto, bajo y nulo; la existencia o no de confinamiento entre paredes paralelas y la energía de la fuente de ignición, distinguiendo entre fuerte (si es debida al venteo de una explosión en el interior de una conducción o situación análoga), y débil (si es debida a una llama, chispa o superficie caliente). La tabla I.6 contiene los criterios citados que permiten seleccionar los niveles más adecuados de las figuras I.5 a I.7, aunque con un elevado nivel de incertidumbre.

TABLA I.6. Criterios para seleccionar el nivel de la explosión más idóneo, parámetro de las figuras I.5 a I.7, según *Kinsella (1993)*

Obstrucción			Confinamiento entre planos paralelos	Energía de la fuente de ignición		Nivel de las figuras I.5 a I.7
Alta	Baja	Nula		Débil	Alta	
Sí			Sí		Sí	7-10
Sí			No		Sí	7-10
Sí			Sí	Sí		5-7
	Sí		Sí		Sí	5-7
	Sí		No		Sí	4-6
		Sí	Sí		Sí	4-6
Sí			No	Sí		4-5
		Sí	No		Sí	4-5
	Sí		Sí	Sí		3-5
	Sí		No	Sí		2-3
		Sí	Sí	Sí		1-2
		Sí	No	Sí		1

Baker (1996) propone el método de Baker-Strehlow utilizando la tabla I.7 (obtenida a partir de la tabla I.2 y de la figura I.1). Con ella se determina la sobrepresión inicial -para la distancia escalada R'_o , que se lleva a la figura I.5 seleccionándose el nivel de la explosión que corresponda, que es el utilizado en las figuras I.5 a I.7.

TABLA I.7. Sobrepresión inicial de la explosión que se utiliza para determinar el nivel (de 1 a 10) en la figura I.5.

Expansión de la llama (confinamiento)	Reactividad del combustible	Sobrepresión inicial de la explosión (kPa) para $R'=R'_0$		
		Nivel de congestión (densidad de obstáculos)		
		Alto	Medio	Bajo
1D (Máximo confinamiento)	Alta	1000	1000	1000
	Media	800	400	200
	Baja	800	200	40
2D (Confinamiento entre dos superficies paralelas)	Alta	400	200	100
	Media	300	120	7
	Baja	120	70	4
3D (Sin confinamiento)	Alta	100	15	4
	Media	40	7	1
	Baja	15	7	1

Nota: Las definiciones de estos parámetros se encuentran en el apartado I.1.2.2

La selección de los niveles de explosión a través de las metodologías anteriores presentan elevadas incertidumbres y los resultados experimentales demuestran que la sobrepresión así calculada suele estar subestimada. (Mercx et al., 1995).

Los autores del método Multienergía, ante la necesidad de una metodología más precisa para seleccionar el nivel de explosión más adecuado, desarrollaron la guía GAME (*Guidance for the Application of the Multi-Energy method*) (Eggen, 1998), y su segunda fase GAMES (GAME Second phase) (Mercx et al, 1998), denominada *Application of correlations to quantify the source strength*. El objetivo de estas guías es encontrar relaciones que permitan determinar la sobrepresión máxima alcanzable en función del escenario a evaluar. Para ello se realizaron numerosas series experimentales de explosiones con diferentes gases, variando las condiciones de obstrucción y confinamiento utilizando estructuras con dimensiones y disposiciones espaciales regulares, tal como se indica en la figura I.8.

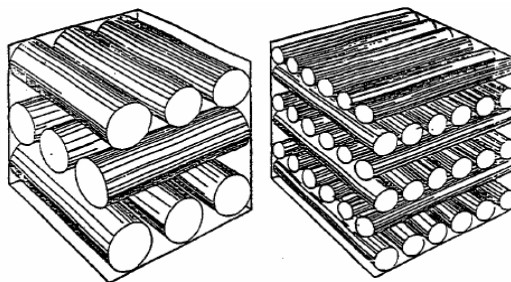


FIGURA I.8. Esquemas de 2 cubos de $3 \times 3 \times 3 \text{ m}^3$ constituidos por 2 tipos de cilindros de dimensiones diferentes usados en los ensayos en los que se basa la guía GAME.

Esta metodología supone que la sobrepresión alcanzada en el seno de la nube depende tanto de ciertas condiciones iniciales (reactividad del combustible, energía de la fuente de ignición, y grado de mezcla combustible-aire), como de las condiciones de frontera (grado de confinamiento de la nube, proporciones geométricas de la zona obstruida, configuración de obstáculos, proporción de volumen obstruido o bloqueado y escala, pues se ha comprobado que la sobrepresión aumenta al aumentar la escala del experimento realizado).

La guía GAME propone la siguiente expresión paramétrica de carácter general:

$$P_i = a (VBR \frac{L_p}{D})^b S_L^{2,7} S_C^{0,7} \quad (\text{I.14})$$

Donde:

P_i : es la sobrepresión media (en bares) en el seno de la nube, que permite obtener el nivel adecuado de la explosión que debe utilizarse en las figuras I.5 a I.7. Para ello, una vez determinada P_i , se calcula la presión escalada (P') mediante la ecuación I.2 y con ella y la figura I.5 se determina el nivel que corresponde a R'_0 . Con él se determina la sobrepresión dinámica (figura I.6), la duración de la fase positiva de la onda de presión (figura I.7) o el impulso escalado (figura 5.6).

VBR : es la relación del volumen bloqueado (Volume Blockage Ratio), definido por la siguiente expresión:

$$VBR = \frac{V_{obs}}{V_{con,min}} \quad (\text{I.15})$$

donde V_{obs} es el volumen total de obstáculos dentro de la zona obstruida, cuyo volumen total es $V_{con,min}$.

L_p : es la distancia recorrida por la llama (en metros), que se hace coincidir con el radio de la semiesfera, forma modelizada de la nube.

D : es el diámetro medio de los obstáculos (en metros) que están en la zona obstruida considerada. La guía GAMES define tres posibles diámetros:

1. Diámetro promedio aritmético: $D_{arm} = \frac{\sum(L_i \cdot D_i)}{\sum L_i} \quad (\text{I.16})$

$$2. \text{ Diámetro promedio armónico: } D_{ham} = \frac{\sum L_i}{\sum \left(L_i \cdot \frac{1}{D_i} \right)} \quad (\text{I.17})$$

$$3. \text{ Diámetro promedio hidráulico: } D_{hym} = 4 \cdot \frac{V_{obs}}{\sum A_i} \quad (\text{I.18})$$

Siendo L_i y D_i (m) las longitudes y diámetros de los objetos de la zona obstruida asimilados a cilindros y V_{obs} (m^3) y $\sum A_i$ (m^2) el volumen total y el área superficial total de los cilindros anteriores. En la mayoría de los casos el diámetro promedio hidráulico (I.18) es el que proporciona mejores resultados.

S_L : es la velocidad laminar de la llama en la nube (m/s). Su valor depende del combustible, tal y como se indica en la tabla I.8, donde se supone que la mezcla con el aire es la estequiométrica.

TABLA I.8. Velocidad de combustión laminar de diferentes combustibles gaseosos en proporciones estequiométricas con el aire (*Mouilleau y Lechaudel, 1999*).

Gas combustible	Velocidad máxima de combustión laminar S_L (m/s)
Hidrógeno	3,5
Metano	0,45
Etano	0,53
Propano	0,52
Butano	0,5
Pentano	0,52
Hexano	0,52
Heptano	0,52
Acetileno	1,58
Etileno	0,83
Propileno	0,66
Butileno	0,57
Benceno	0,62
Ciclohexano	0,52
Amoníaco	0,07

S_C : es un factor de escala, habiéndose comprobado que puede quedar representado por el diámetro promedio de obstáculos (D).

a y b : son parámetros de ajuste, habiéndose propuesto los valores que se indican en las siguientes ecuaciones:

Nube no confinada (cuya expansión se produce en las 3 dimensiones del espacio):

$$P_i = 0,84 \left(VBR \frac{L_P}{D} \right)^{2,75} S_L^{2,7} D^{0,7} \quad \text{(I.19)}$$

Nube confinada entre planos paralelos (cuya expansión se produce en dos dimensiones):

$$P_i = 3,38 \left(VBR \frac{L_P}{D} \right)^{2,25} S_L^{2,7} D^{0,7} \quad \text{(I.20)}$$

En ambos casos se supone que la fuente de ignición es de baja energía, tal como una chispa o una pequeña llama.

Las aproximaciones de las sobrepresiones obtenidas con las ecuaciones I.19 y I.20 respecto a las producidas en accidentes reales dependen de las similitudes de los escenarios experimentales y reales, cuyas diferencias más comunes proceden principalmente de los aspectos siguientes:

1. La relación entre las dimensiones externas. Los ensayos fueron realizados con módulos cúbicos; si la geometría real es más alargada, la correlación sobreestima los valores de la sobrepresión, puesto que no tiene en cuenta el efecto de venteo lateral o superior que hace disminuir la sobrepresión alcanzable.
2. La localización de la ignición, que condiciona la distancia recorrida por la llama (L_p). Los ensayos se realizaron con ignición central; si no es así, las correlaciones tienden a sobreestimar la sobrepresión, dado que en estos casos se facilita el venteo.
3. La homogeneidad en la distribución de obstáculos. Los ensayos fueron realizados para distribuciones regulares de obstáculos del mismo tamaño, donde se alcanzan las mayores sobrepresiones, por lo que los resultados estarán sobreestimados si la distribución real es más heterogénea.

Como se deduce de estos comentarios, la aplicación de las ecuaciones I.19 y I.20 a los escenarios reales sobreestima las sobrepresiones, por lo que esta metodología permite seleccionar de forma conservadora el nivel a utilizar en el método Multienergía. Tan sólo en algunos casos especiales se subestima el valor de la sobrepresión inicial (por ejemplo, en aquéllos en los que el valor de VBR sea inferior a 0.05 y la zona obstruida tenga un volumen inferior a 1000 m³). En tales casos se optará por seleccionar el nivel 10, manteniendo de esta manera el carácter conservador del método Multienergía.

I.3.2. Procedimiento de aplicación del método Multienergía

La figura I.9 indica la secuencia del método Multienergía siguiendo la propuesta de *TNO (1997)*, incluyendo algunos procedimientos desarrollados en este trabajo.

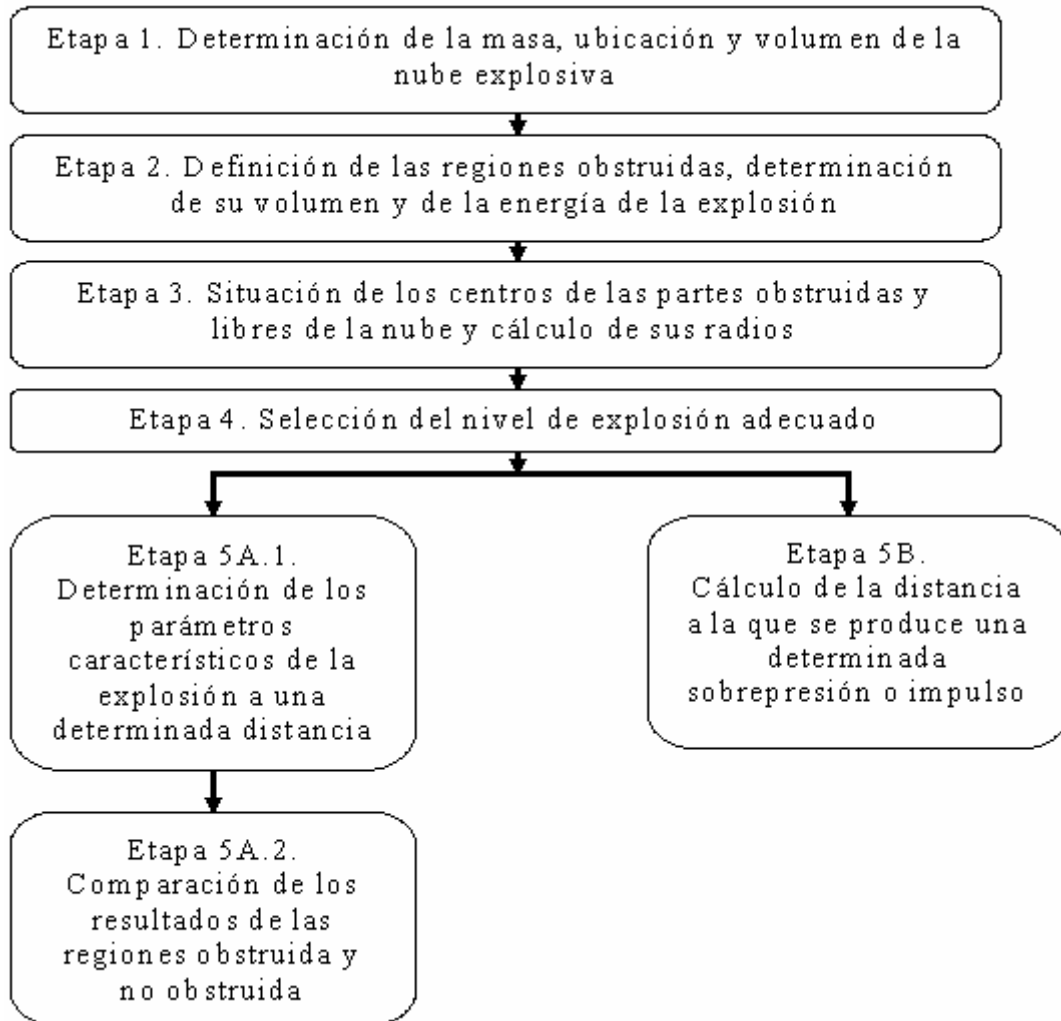


FIGURA I.9. Secuencia de aplicación del método Multienergía

Etapa 1. Determinación de la masa, ubicación y volumen de la nube explosiva.

- Masa y ubicación de la nube explosiva.
 - o Se debe aplicar un modelo de fuga y dispersión para determinar la masa de nube contenida entre los límites de inflamabilidad (m_{exp}) y establecer la ubicación de la misma. Esta última dependerá de la dirección del transporte provocado por el viento y geometría del escenario considerado.
- El volumen de la nube explosiva (V_c , m^3) se determina mediante la siguiente expresión:

$$V_c = \frac{m_{\text{exp}}}{\rho X_s} \quad (\text{I.21})$$

donde ρ es la densidad de la sustancia fugada (kg/m^3) en condiciones de presión y temperatura ambiental y X_s es la fracción molar estequiométrica del combustible en aire, calculado mediante la expresión:

$$X_s = \frac{n_{\text{HC}}}{(n_{\text{HC}} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2})} \quad (\text{I.22})$$

Siendo n el número de moles de cada una de las especies señaladas (el subíndice HC se refiere al combustible).

Etapa 2. Definición de las regiones obstruidas, determinación de su volumen y de la energía de la explosión.

- Una 'región obstruida' es aquella en la que hay una elevada densidad de objetos, equipos y/o edificaciones.
- Cálculo del volumen de las zonas obstruidas:
 - o Modelizar cada zona obstruida como una caja paralelepípedica de dimensiones a_i , b_i y c_i (en metros), por lo que el volumen de la caja, $V_{\text{caja } i}$, vendrá dado por la expresión:

$$V_{\text{caja } i} = a_i \times b_i \times c_i \quad (\text{I.23})$$

- Obtención del volumen libre dentro de cada caja, $V_{nube\ i}^*$, que será ocupado por la nube, mediante:

$$V_{nube\ i}^* = V_{caja\ i} - V_{obj\ i} \quad (I.24)$$

donde $V_{obj\ i}$ (m^3) es el volumen de los objetos contenidos en la caja.

- El volumen total de nube obstruida, V_{gr} , es la suma de los volúmenes $V_{nube\ i}^*$ de las cajas -obtenidos mediante la ecuación I.24-:

$$V_{gr} = \Sigma V_{nube\ i}^* \quad (I.25)$$

y, por consiguiente, el volumen de la parte no obstruida o libre de la nube, V_0 , es:

$$V_0 = V_c - V_{gr} \quad (I.26)$$

- Las energías liberadas en la explosión de las partes obstruida y no obstruida de la nube se obtienen mediante:

Parte obstruida: $E_{exp\ gr} = V_{gr} \rho X_s \Delta H_c \quad (I.27)$

Parte no obstruida: $E_{exp\ 0} = V_0 \rho X_s \Delta H_c \quad (I.28)$

donde ΔH_c es la entalpía de combustión de la sustancia fugada, J/kg.

Etapa 3. Situación de los centros de las partes obstruidas y libres de la nube y cálculo de sus radios.

No hay un criterio general para la localización de los centros de las partes obstruidas y libres de la nube. Estos puntos característicos se usan como lugares donde hipotéticamente se concentrarán las masas de las nubes obstruida y libre. No obstante, el criterio de localización más utilizado es considerarlos como los centros de masa de ambos sistemas. Cada uno de estos centros se toma como origen de distancia en los diagramas sobrepresión-distancia o impulso-distancia, aunque la distancia mínima a la que el método permite calcular la sobrepresión es la correspondiente al radio de la nube considerada semiesférica (que equivale a R'_0 en las figuras I.5 a I.7).

Para el cálculo de los radios de cada una de las partes de la nube (obstruida y libre), se consideran semiesferas de volúmenes V_{gr} (para la parte obstruida) y V_0 (para la parte no obstruida o libre). Dichos radios se calculan mediante las expresiones:

$$R_o^{gr} = \sqrt[3]{\frac{3}{2} \frac{V_{gr}}{\pi}} \quad (\text{I.29})$$

$$R_o^o = \sqrt[3]{\frac{3}{2} \frac{V_0}{\pi}} \quad (\text{I.30})$$

Etapa 4. Selección del nivel de explosión adecuado.

Dependiendo de la información disponible y de la precisión requerida puede emplearse cualquiera de los métodos descritos en el apartado I.3.1. El más simple es también el menos preciso, y consiste en seleccionar el nivel 7 para la parte obstruida de la nube y el 3 para la no obstruida. El criterio más preciso es el propuesto por las guías GAME y GAMES, pero es también el que requiere más información. Entre ambos se encuentran las propuestas de Kinsella y Baker, que sólo requieren información cualitativa pero adolecen de mayor incertidumbre que el anterior.

A partir de esta etapa se pueden calcular los parámetros característicos de la onda de presión a una determinada distancia siguiendo las etapas 5A.1 y 5A.2. Si se desea realizar el proceso inverso, esto es, calcular la distancia a la que se produce un determinado valor de la sobrepresión o del impulso (como sucede en el cálculo de las Zonas de Planificación), debe seguirse la etapa 5B.

Etapa 5A.1. Determinación de los parámetros característicos de la explosión a una determinada distancia

- Los parámetros característicos de la explosión a una distancia z , en metros, del centro de la nube se calculan mediante las figuras I.5 a I.7. Para la zona obstruida, la selección del nivel se llevará a cabo por el método GAME, descrito en el apartado I.3.1; para la zona no obstruida se utiliza siempre el nivel 3. Para ello, se calcula el parámetro distancia escalada, R' ;

$$R' = \frac{z}{\sqrt[3]{\frac{E_{\text{exp}}}{P_0}}} \quad (\text{I.3})$$

- La figura I.5 permite determinar P' , utilizando el valor de R' calculado antes, y con ella P_s :

$$P_s = P' P_0 \quad (\text{I.31})$$

- Mediante la figura I.6 se determina la sobrepresión dinámica escalada (Q') para R' , y con ella la presión dinámica, Q :

$$Q = Q' P_0 \quad (\text{I.32})$$

- La duración de la fase positiva escalada se determina para R' mediante la figura I.7 y a partir de ella la duración de la fase positiva, t_p :

$$t_p = t'_p \frac{\sqrt[3]{\frac{E_{\text{exp}}}{P_0}}}{c_0} \quad (\text{I.33})$$

- Finalmente, el impulso i se determina suponiendo que el perfil sobrepresión-tiempo es triangular:

$$i = \frac{1}{2} P_s t_p \quad (\text{2.2})$$

Los cálculos anteriores se realizan tanto para la parte obstruida como para la no obstruida de la nube.

Etapa 5A.2. Comparación de los resultados de las regiones obstruida y no obstruida.

La onda de presión formada en la combustión de la parte de nube obstruida presenta un pico brusco de corta duración. La combustión lenta de la parte de la nube no obstruida dará lugar a picos mucho más suavizados, con tiempos de paso más dilatados, de menores efectos. No obstante, debe tenerse en cuenta también los tamaños de dichas zonas. Así, puede darse el caso de que la parte obstruida sea pequeña y la no obstruida grande, lo que provocaría efectos similares.

La división de la nube real en zonas obstruidas y no obstruidas es más conceptual que real, por lo que en la práctica no se producirán dos explosiones diferentes. Por ello, se seleccionan los resultados que originan las peores consecuencias que, en todo caso, son sólo orientativos.

Etapa 5B. Cálculo de la distancia a la que se produce una determinada sobrepresión o impulso

Cuando se desea calcular la distancia a la que se produce una sobrepresión o impulso determinados, como en el caso del establecimiento de las Zonas de Planificación, se sigue el siguiente procedimiento:

Cálculo de la sobrepresión escalada o del impulso escalado:

Utilizando la ecuación I.2 ó 5.23 se calcula la sobrepresión o el impulso escalados correspondientes a los valores de sobrepresión estática o impulso deseados.

Obtención de la distancia escalada, R' :

El valor de R' se obtiene a partir de las figuras I.5 ó 5.6 para P' o i' , respectivamente, calculados en la etapa anterior.

Cálculo de la distancia (z , en metros):

A partir de la ecuación I.3 se obtiene la distancia que corresponde a la distancia escalada obtenida en la etapa anterior.

I.4. MÉTODOS ESPECÍFICOS PARA ESTALLIDO DE RECIPIENTES

Dentro de este tipo de explosiones pueden distinguirse casos muy diferentes en cuanto a sus causas y fenomenología, como se indica en el capítulo 2. La característica común es la rotura del recipiente como consecuencia de mantener o producirse en su interior altas presiones, de manera que parte de la energía liberada se invierte en la formación de la onda de presión y en la proyección de los fragmentos del contenedor. Para la formación de la onda, el recipiente debe contener un gas o un líquido que sufra una vaporización súbita (flash) en el momento de la rotura.

En este apartado se estudian métodos de cálculo de las explosiones de recipientes a presión y la denominada BLEVE, indicados para la evaluación de los parámetros característicos de la onda de presión (sobrepresión e impulso), y la metodología para la determinación del alcance de los fragmentos.

I.4.1. El método de Baker

Este método se aplica para el cálculo de la sobrepresión e impulso generado en el estallido, siguiendo para ello alternativas que dependen del estado físico del fluido (gas, vapor o líquido-vapor) considerando contenedores esféricos elevados. Para depósitos cilíndricos o próximos al suelo se utilizan factores de corrección.

En la figura I.10 se resume la secuencia de cálculo.

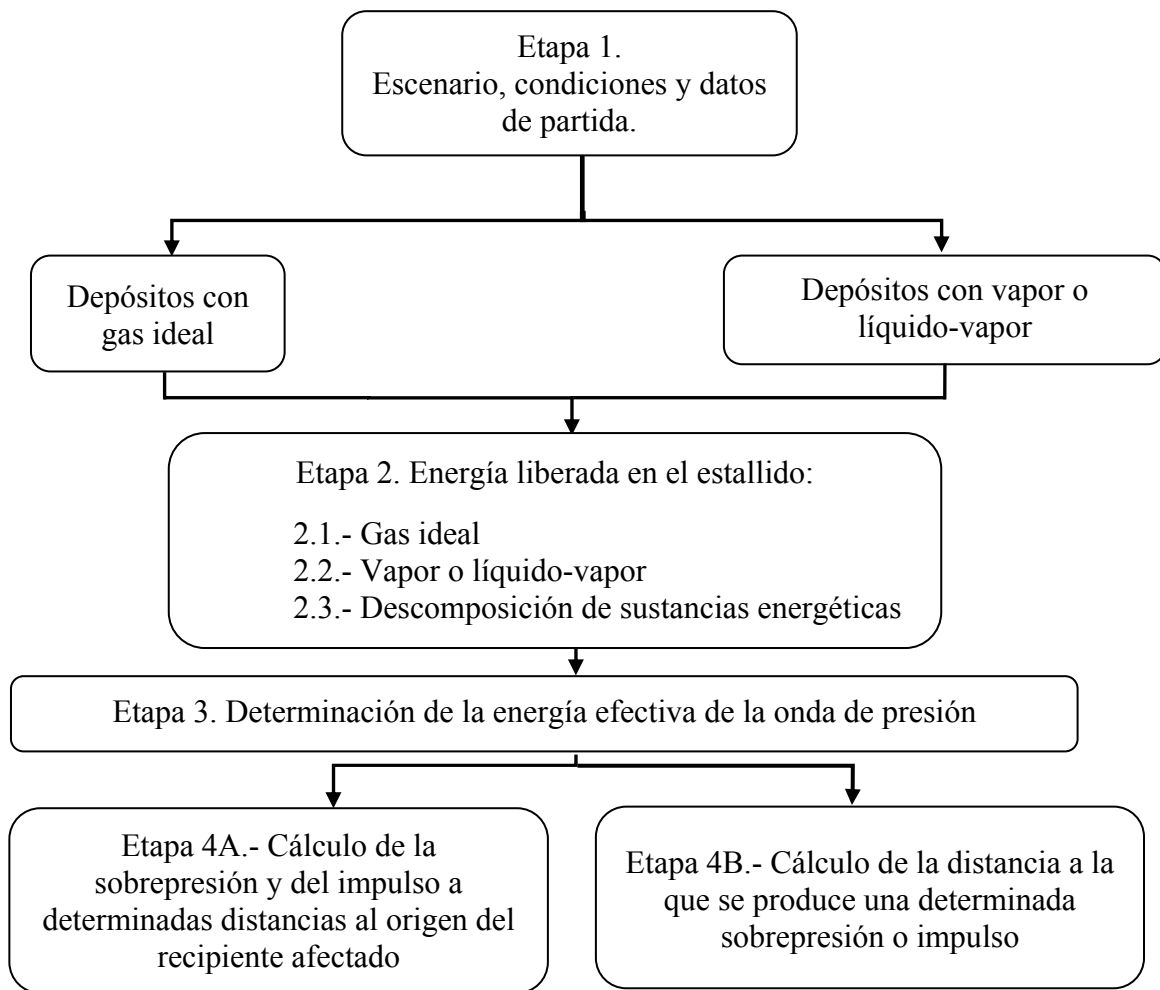


FIGURA I.10. Secuencia de aplicación del método de Baker.

Etapla 1. Escenario, condiciones y datos de partida.

Datos necesarios:

- Sustancia y estado físico (gas, vapor o líquido-vapor).
- Causa de la rotura (debilitamiento del material -corrosión, fatiga...-, fuego externo, sobrellenado, reacción fuera de control, etc). Esta información puede relacionarse con la presión de fallo del equipo (ver tabla I.9).
- Volumen del recipiente ocupado por el gas y, en su caso, por el líquido.
- Constante de Poisson del gas, γ_1 (C_p/C_v).
- Forma del recipiente (cilíndrica o esférica) y situación (sobre el suelo o elevado).

La presión en el momento de la explosión puede ser estimada con la ayuda de la tabla I.9, propuesta por *TNO (1997)*:

TABLA I.9. Valores de la presión de rotura para el método de Baker

Causa de la rotura	Presión de fallo
Corrosión del recipiente, erosión, defectos del material, fatiga, impacto externo	Presión de almacenamiento u operación
Fuego externo	$1.21 \times$ presión de abertura de la válvula de seguridad.
Sobrellenado y fallo de la válvula de seguridad	Presión de diseño \times factor de seguridad (normalmente 2.5)
Sobrecalentamiento y fallo de la válvula de seguridad	Presión de diseño \times factor de seguridad (normalmente 2.5)
Reacción fuera de control	Presión de diseño \times factor de seguridad (normalmente 2.5)
Explosión interna	Mezcla cercana al LIE (1): 3 ó 4 veces la presión inicial Mezcla estequiométrica: 8 a 10 veces la presión inicial

(1) LIE: Límite Inferior de Explosividad de la sustancia.

Se distinguen tres casos:

1. El fluido es un gas permanente (no licuado). La energía puesta en juego en el estallido se calcula considerando la sustancia como gas ideal.

2. El fluido es un vapor o un sistema líquido-vapor a presión superior a la atmosférica. En este caso la energía se determina utilizando parámetros y expresiones termodinámicas, gráfica o analíticamente. Se denomina genéricamente sistema no ideal, siendo la BLEVE un representante típico.
3. El estallido se produce como consecuencia de la descomposición de una sustancia energética, siendo el nitrometano un ejemplo típico. En este caso la energía se calcula a partir de la cantidad de sustancia contenida en el recipiente y de la energía de la reacción de descomposición.

Etapa 2. Determinación de la energía liberada

Caso 2.1.- Gas ideal

La energía que libera un gas ideal comprimido al expandirse hasta la presión atmosférica (E_{av} , en Julios) se calcula mediante la expresión:

$$E_{av} = \frac{(p_1 - P_0) V_g}{\gamma_1 - 1} \quad (\text{I.34})$$

Donde:

p_1 : Presión absoluta del gas (Pa).

P_0 : Presión atmosférica (Pa).

V_g : Volumen de gas en el recipiente (m^3).

γ_1 : Relación de los calores específicos del gas en el sistema.

Caso 2.2.- Sistema no ideal (vapor o líquido-vapor)

El trabajo realizado por un fluido en expansión se define como la diferencia de energía interna entre los estados inicial (subíndice 1) y final (subíndice 2) de la expansión.

La energía interna de un fluido se calcula mediante:

$$u = h - p \cdot v \quad (\text{I.35})$$

Donde:

u : Energía interna específica (J/kg).

h : Entalpía específica (J/kg).

p : Presión absoluta (Pa).

v : Volumen específico (m^3/kg).

Para la determinación de h , p y v pueden utilizarse diagramas presión-entalpía o datos termodinámicos.

Si se utiliza un diagrama presión-entalpía (figura I.11), el procedimiento es el siguiente:

- Se parte de la situación inicial antes del estallido (para P_1 y T_1) representada por el punto 1, cuya posición en el diagrama depende de las masas relativas de vapor (vap) y líquido (liq) contenidas en el recipiente. Se obtiene para dicho punto la entalpía h_1 y el volumen específico v_1 , que se sustituyen en la ecuación I.35, obteniéndose la energía interna del estado inicial, u_1 .

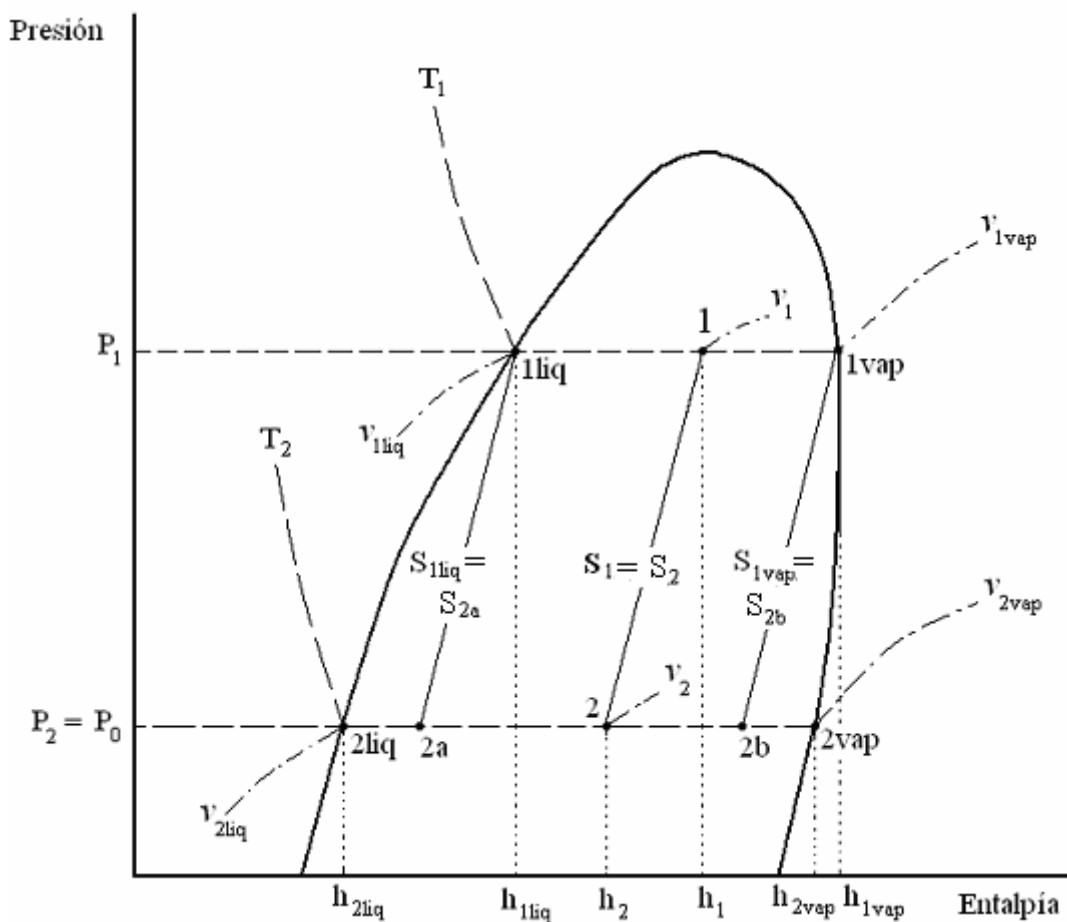


FIGURA I.11. Evolución isoentrópica de un sistema líquido-vapor desde la situación 1 a la 2 (esta última a presión atmosférica), como consecuencia del estallido de un recipiente.

- Cuando se produce la rotura del recipiente, el sistema líquido-vapor evoluciona rápidamente de la situación 1 a la 2 siguiendo una línea isoentrópica (esto es, $s_1 = s_2$). En la situación final 2 -a presión atmosférica- se procede igual que en la inicial, obteniéndose los

valores de entalpía h_2 y volumen específico v_2 , y calculando el valor de u_2 mediante la expresión I.35.

La energía liberada en el estallido se determina considerando la masa total del sistema, M_{total} , que es la misma en ambas situaciones.

$$E_{av} = M_{total} (u_1 - u_2) \quad (\text{I.36})$$

Si se utilizan datos termodinámicos, se determina la energía interna específica de cada una de las fases (u_{1liq} y u_{1vap}) a la presión inicial P_1 mediante la ecuación I.35. Cada una de estas fases evoluciona rápidamente siguiendo una isoentrópica hasta alcanzar la presión atmosférica (representados en la figura I.11 por las situaciones 2a y 2b). La energía interna de cada una de ellas (u_{2a} y u_{2b}) se determina mediante la ecuación siguiente:

$$u_2 = (1-X) h_{2liq} + X h_{2vap} - (1-X) P_0 v_{2liq} - X P_0 v_{2vap} \quad (\text{I.37})$$

donde X (adimensional) es la fracción de vapor, que debe calcularse para cada una de las situaciones mencionadas anteriormente, mediante las expresiones I.38a y I.38b, respectivamente.

$$X_a = (s_{1liq} - s_{2liq}) / (s_{2vap} - s_{2liq}) \quad \text{Para la situación 2a} \quad (\text{I.38a})$$

$$X_b = (s_{1vap} - s_{2liq}) / (s_{2vap} - s_{2liq}) \quad \text{Para la situación 2b} \quad (\text{I.38b})$$

La energía total liberada, E_{av} , se obtiene a partir de las energías internas antes calculadas, teniendo en cuenta las masas parciales de líquido y vapor en la situación inicial (m_{1liq} y m_{1vap}), que son también las de 2a y 2b. Así:

$$E_{av} = (m_{1liq} u_{1liq} + m_{1vap} u_{1vap}) - (m_{1liq} u_{2a} + m_{1vap} u_{2b}) \quad (\text{I.39})$$

Caso 2.3.- Descomposición de sustancias energéticas

Se produce cuando una sustancia en el interior del recipiente se descompone violentamente sin necesidad de un comburente. En este caso no es posible conocer la presión de rotura, calculándose directamente la energía máxima que se puede liberar en función de la cantidad de sustancia involucrada. Un ejemplo típico es el de la descomposición del nitrometano. La energía liberada se calcula como el producto de la masa de sustancia por la entalpía de la reacción de descomposición. Debe tenerse en cuenta que este método suele sobreestimar los efectos de la explosión, puesto que a menudo sólo participa en el estallido una parte de la sustancia contenida en el recipiente.

Etapa 3. Determinación de la energía efectiva de la onda de presión, E_{exp} (J)

El método de Baker es muy conservador, dado que acepta que toda la energía liberada forma la onda expansiva. Además, si el recipiente se encuentra cerca del suelo, debe tenerse en cuenta la reflexión de la onda que, como se indica en el apartado 2.2, da lugar a mayores sobrepresiones que las de la onda incidente. El método supone que la sobrepresión generada por la onda reflejada es similar a la que generaría una onda con doble energía, por lo que la “energía efectiva” de la onda de presión (E_{exp}) se determina mediante:

$$E_{exp} = A_{sb} E_{av} \quad (I.40)$$

El factor A_{sb} tiene en cuenta la mencionada reflexión de la onda contra el suelo. Su valor es la unidad cuando el recipiente se encuentra suficientemente elevado, ó 2 cuando el recipiente está situado cerca del suelo. Se considera que el recipiente está cerca del suelo cuando el ángulo formado por la línea que une el punto donde se desea determinar los efectos de la explosión y el recipiente es igual o menor a 15° -ver figura I.12-.

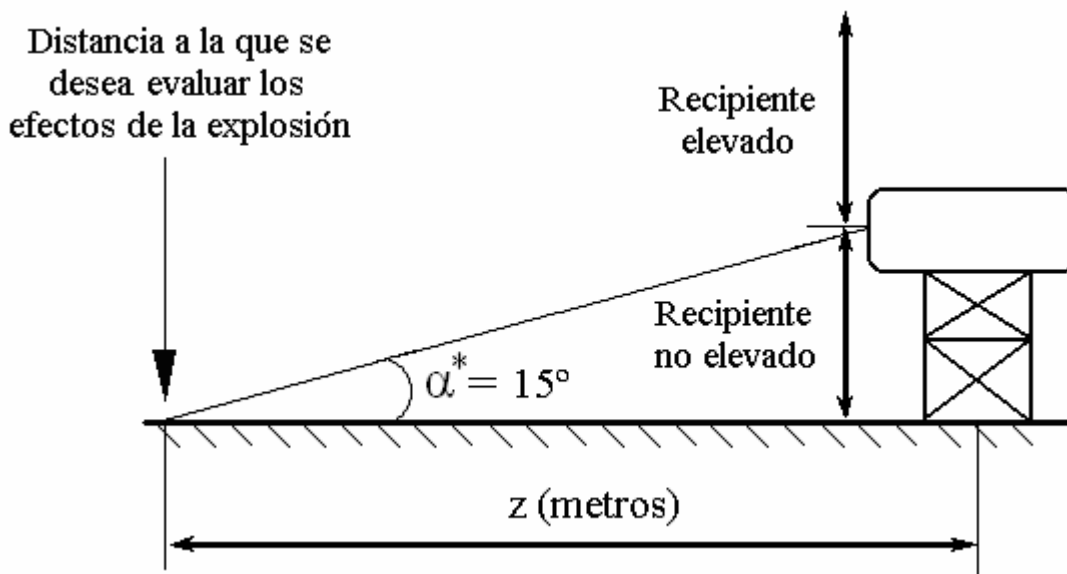


FIGURA I.12. Criterio para diferenciar recipientes elevados y no elevados. Si α^* es superior o inferior a 15° el recipiente se considera que está elevado o prácticamente sobre el suelo.

A partir de esta etapa se presentan dos posibilidades:

- A.- Cálculo de la sobrepresión y del impulso a determinadas distancias del origen del recipiente afectado.
- B.- Determinación de las Zonas de Planificación.

Etapa 4A. Cálculo de la sobrepresión y del impulso a determinadas distancias del origen del recipiente afectado.

Cálculo de la distancia escalada, R' :

La distancia escalada desde el origen de la explosión hasta el lugar donde se desea evaluar los efectos de la misma (R' , adimensional) se ha definido anteriormente como:

$$R' = z \left(\frac{P_0}{E_{exp}} \right)^{1/3} \quad \text{(I.3)}$$

Donde z es la distancia en metros al recipiente desde el punto antes considerado, y E_{exp} se ha obtenido en la etapa anterior.

Determinación de la sobrepresión escalada:

Para distancias próximas al origen de la explosión de depósitos ($R' < 2$) que contengan gases ideales, Baker propone un procedimiento que permite obtener resultados más exactos, conocido como *método de Baker refinado* (apartado I.4.1.1). Para el resto de casos se utiliza la figura I.13, que permite determinar la sobrepresión escalada P' .

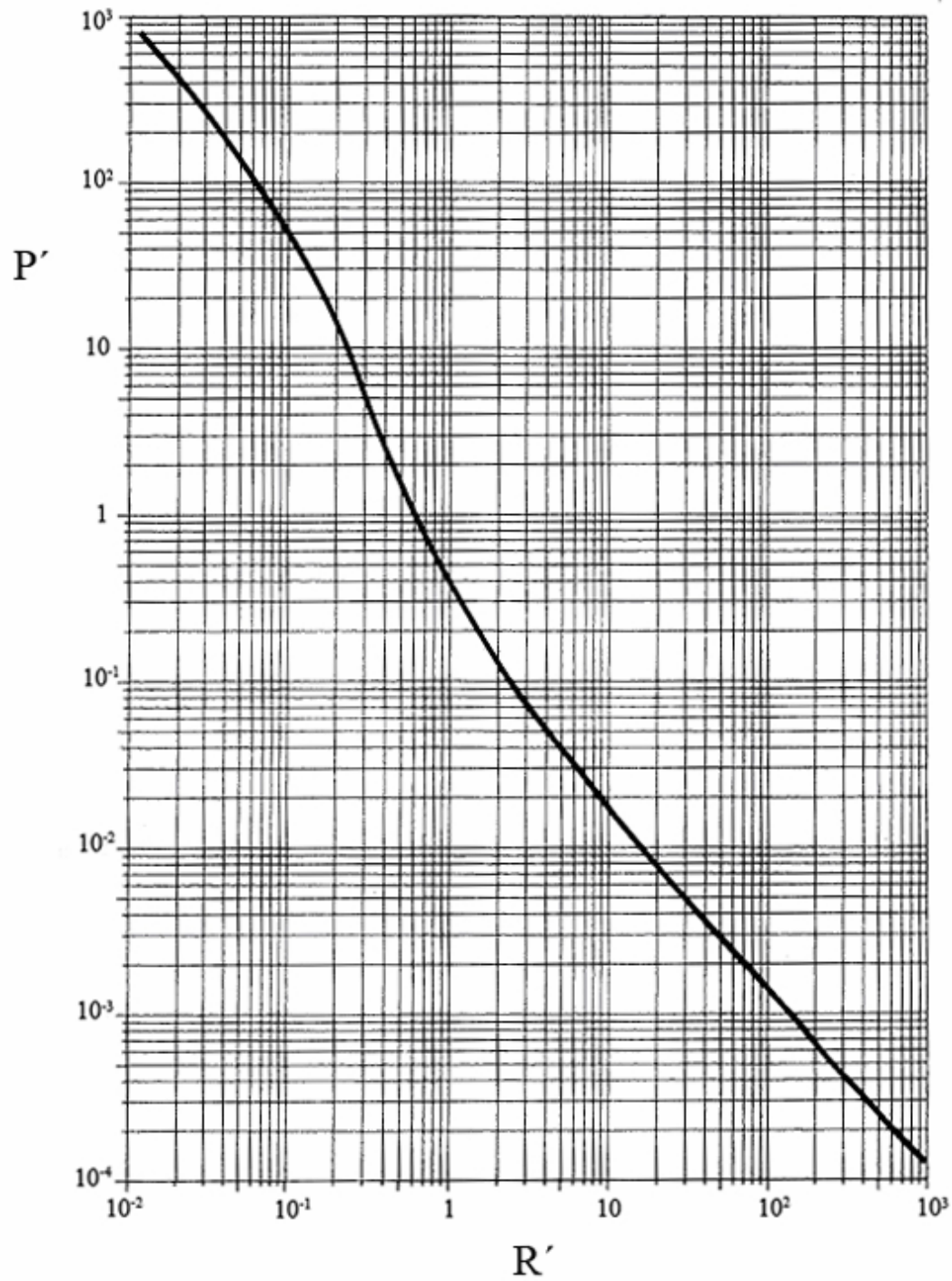


FIGURA I.13. Sobrepresión escalada (P') frente a distancia escalada (R') para el estallido de recipientes (Baker et al. 1977).

I.4.1.1. Método de Baker refinado. Determinación de la sobrepresión escalada P' para el estallido de un recipiente a presión con un gas ideal y distancia escalada $R' < 2$

En este apartado se expone la metodología de cálculo de la sobrepresión escalada para recipientes con gas ideal y distancias-energías escaladas $R' < 2$.

La secuencia que debe seguirse para la aplicación del *método de Baker refinado* se indica en la figura I.14.

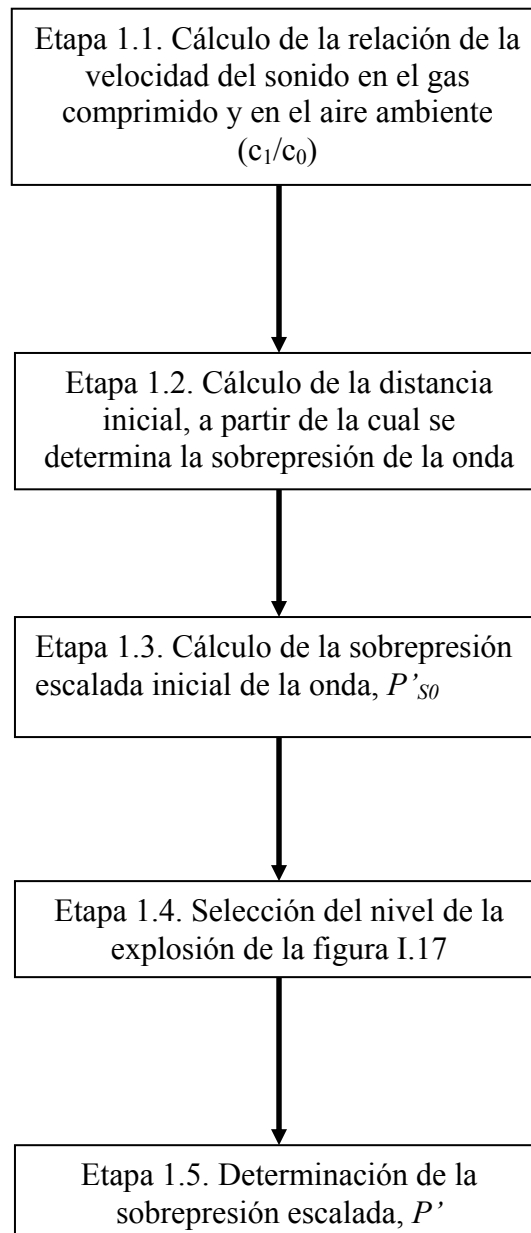


FIGURA I.14. *Secuencia de aplicación del método de Baker refinado, para recipientes con gas ideal y $R' < 2$*

Etapa 1.1. Cálculo de la relación de la velocidad del sonido en el gas comprimido y en el aire ambiente (c_1/c_0)

Para un gas ideal, dicha relación se calcula mediante la ecuación:

$$\left(\frac{c_1}{c_0}\right)^2 = \frac{\gamma_1 T_g \mu_a}{\gamma_a T_a \mu_1} \quad (\text{I.41})$$

donde:

c_1 : Velocidad del sonido en el gas comprimido (m/s).

c_0 : Velocidad del sonido en el aire ambiente(m/s).

γ_1 : Razón de calores específicos del gas (adimensional).

γ_a : Razón de calores específicos del aire (1.4).

T_g : Temperatura absoluta del gas comprimido (K).

T_a : Temperatura absoluta del aire ambiente (K).

μ_a : Masa molecular del aire ambiente (0.029 kg/mol).

μ_1 : Masa molecular del gas (kg/mol).

Etapa 1.2. Cálculo de la distancia inicial

El método supone que la onda de presión es completamente simétrica, que correspondería al estallido de un recipiente semiesférico situado sobre el suelo. Ha de calcularse el radio del recipiente semiesférico (z_o , metros) equivalente al volumen de gas contenido en el recipiente real (V_g , m³).

$$z_o = \left(\frac{3V_g}{2\pi}\right)^{1/3} = 0.782 V_g^{1/3} \quad (\text{I.42})$$

Esta distancia es la mínima para determinar la sobrepresión, que debe convertirse en la distancia-energía escalada (R'_o), definida mediante la ecuación:

$$R'_o = z_o \left(\frac{P_0}{E_{\text{exp}}}\right)^{1/3} \quad (\text{I.43})$$

Etapa 1.3. Cálculo de la sobrepresión escalada inicial P'_{s0}

La sobrepresión inicial de la explosión es mucho menor que la presión interna del recipiente en el momento del fallo. La sobrepresión escalada inicial (P'_{s0} , adimensional) se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{p_1}{P_0} = (P'_{s0} + 1) \left(1 - \frac{(\gamma_1 - 1)(c_0 / c_1) P'_{s0}}{[2\gamma_a(2\gamma_a + (\gamma_a + 1)) P'_{s0}]^{1/2}} \right)^{\frac{-2\gamma_1}{\gamma_1 - 1}} \tag{I.44}$$

donde

- p_1 : Presión inicial absoluta del gas comprimido antes del estallido (Pa).
- P_0 : Presión atmosférica (Pa).
- γ_a : Razón de calores específicos del aire (1.4).
- γ_1 : Razón de calores específicos del gas comprimido (adimensional).
- c_0 : Velocidad del sonido en el aire ambiente (340 m/s).
- c_1 : Velocidad del sonido en el gas comprimido (m/s).

En la ecuación I.44 P'_{s0} es una variable implícita y ha de calcularse mediante un procedimiento iterativo. Una alternativa para determinar P'_{s0} es utilizar las figuras I.15 ó I.16.

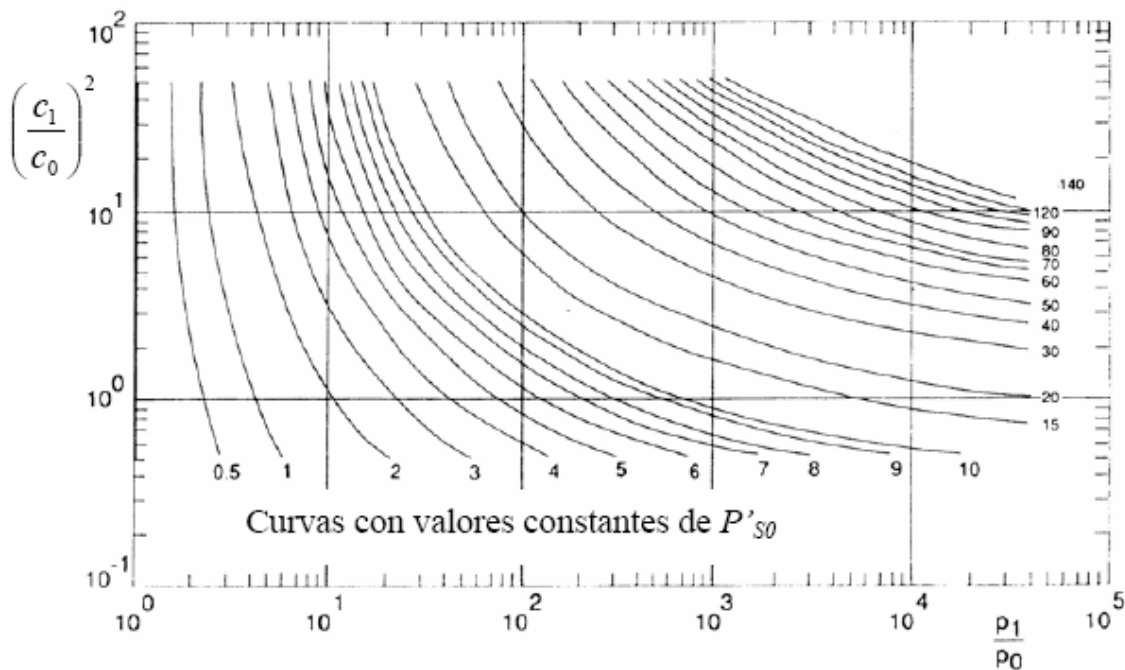


FIGURA I.15. Relación de las velocidades del sonido en el gas y en el aire ambiente frente a la relación de la presión de rotura y la atmosférica (p_1/P_0) para diferentes valores de la sobrepresión escalada inicial P'_{s0} y $\gamma_1=1.4$ (Baker et al. 1977).

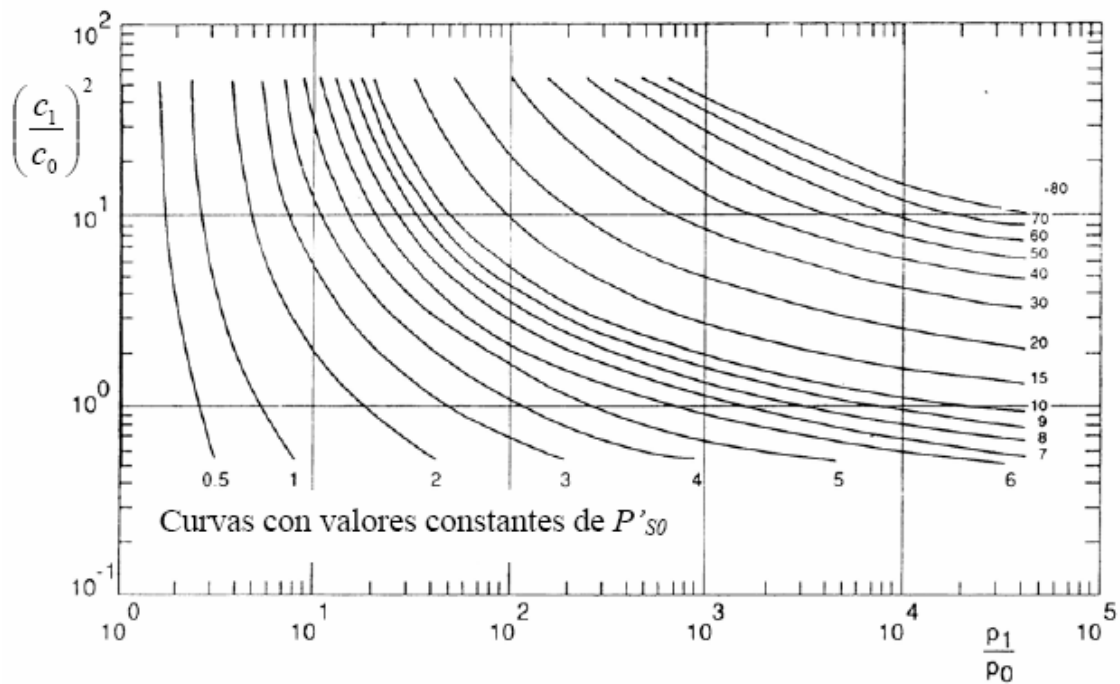


FIGURA I.16. Relación de las velocidades del sonido en el gas y en el aire ambiente frente a la relación de la presión de rotura y la atmosférica (p_1/P_0) para diferentes valores de la sobrepresión escalada inicial P'_{s0} y $\gamma_1=1.66$ (Baker et al. 1977).

Etapa 1.4. Selección del nivel de la explosión de la figura I.4

En la figura I.17, con los valores de R'_o y P'_{s0} se selecciona el nivel de la explosión.

Etapa 1.5. Determinación de la sobrepresión escalada, P'

Utilizando el nivel seleccionado en la etapa anterior, se obtienen los diferentes valores de la sobrepresión escalada (P') que corresponden a las distancias seleccionadas (mediante los respectivos valores de R').

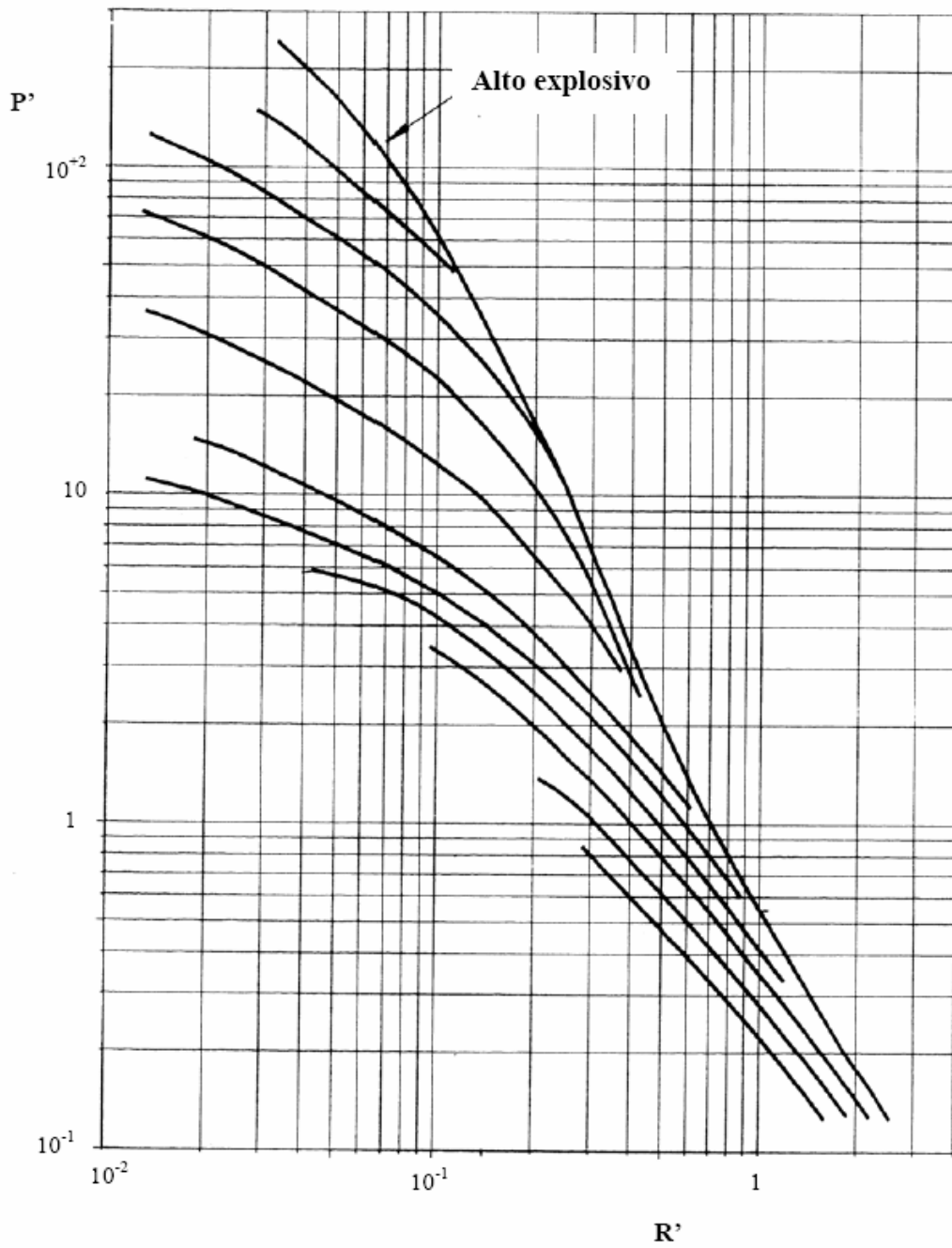


FIGURA I.17. Sobrepresión escalada (P') frente a distancia escalada (R')
(Baker et al., 1977).

Determinación del impulso escalado:

Independientemente de si la sobrepresión escalada se ha determinado con la figura I.13 ó I.17 (método de Baker o método refinado) el impulso escalado, i' , se determina con la figura I.18 para cada una de las distancias seleccionadas a través de los correspondientes valores de R' , obtenidos en la etapa 4A.

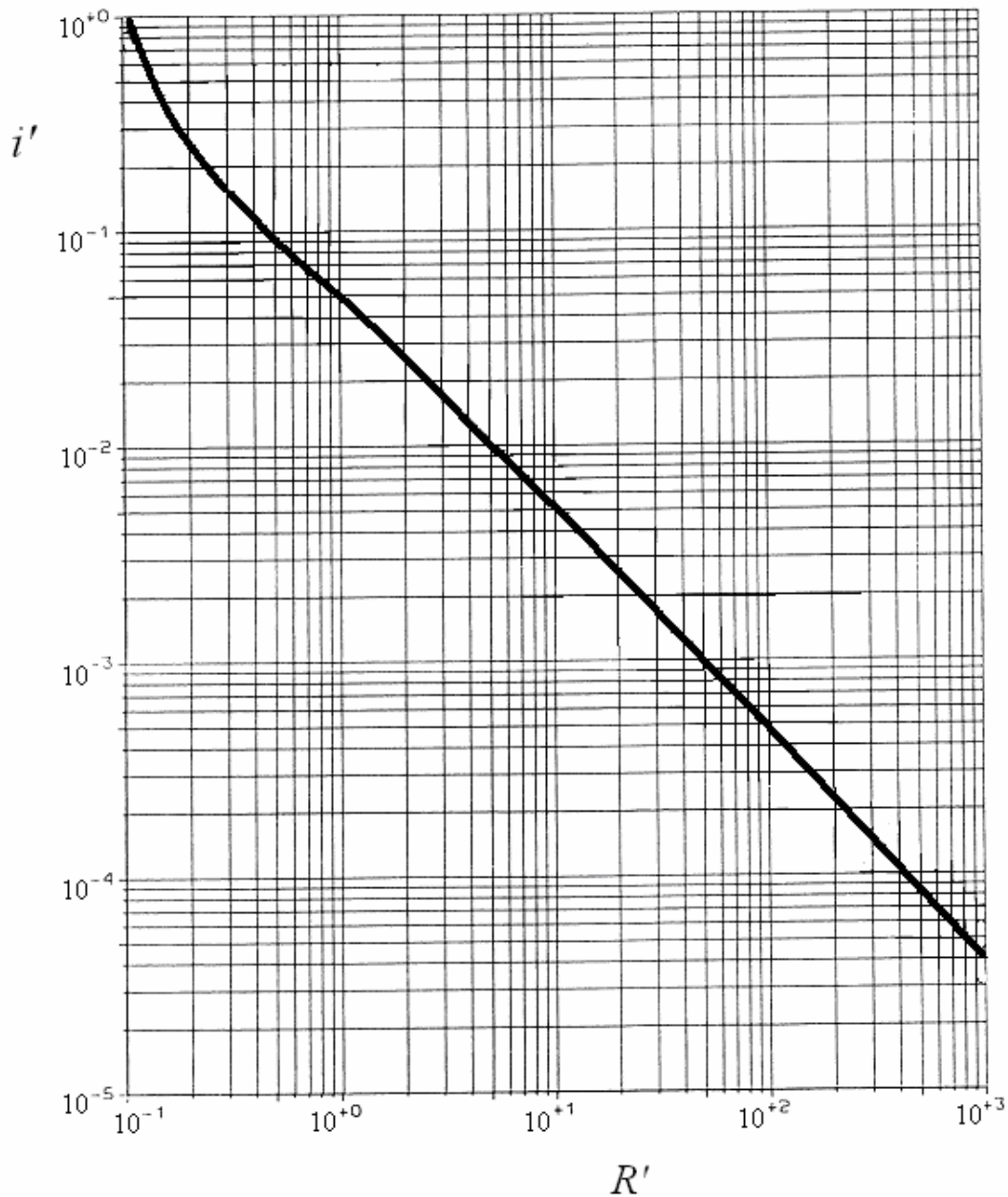


FIGURA I.18. Impulso escalado (i') frente a la distancia escalada (R') para el estallido de recipientes (Baker et al. 1977).

Ajuste de la sobrepresión escalada y del impulso escalado por efectos geométricos y de situación:

El procedimiento anteriormente descrito es aplicable a una onda de presión completamente simétrica, que sería el resultado del estallido de un recipiente esférico elevado, pero en la práctica muchos recipientes son cilíndricos y están ubicados próximos al suelo. Para tener en cuenta estos efectos, los resultados obtenidos deben multiplicarse por los factores de ajuste de las tablas I.10 y I.11, que dependen de la geometría y ubicación de los recipientes.

TABLA I.10. Factores de ajuste para determinar la sobrepresión escalada (P') y el impulso escalado (i') para recipientes cilíndricos.

R'	Factor multiplicador (F)	
	Para P'	Para i'
<0.3	4	2
≥ 0.3 y ≤ 1.6	1.6	1.1
> 1.6 y ≤ 3.5	1.6	1
> 3.5	1.4	1

TABLA I.11. Factores de ajuste para determinar la sobrepresión escalada (P') y el impulso escalado (i') para recipientes cercanos al suelo con ángulos inferiores a 15° (ver etapa 3).

R'	Factor multiplicador (F)	
	Para P'	Para i'
<1	2	1.6
≥ 1	1.1	1

Interesa indicar que la onda de presión generada por el estallido de un recipiente cilíndrico es asimétrica, y suele ser más débil en la dirección del eje del cilindro. El método únicamente predice el valor máximo, que corresponde a la propagación de la onda en la dirección perpendicular al eje del cilindro.

Cálculo de la sobrepresión estática y del impulso:

Corregidos los valores de P' e i' se calculan los valores de la sobrepresión estática (P_s en Pa) y del impulso mecánico de la onda (i , en Pa·s) producida en la explosión mediante:

$$P_s = P' P_0 \quad (\text{I.31})$$

$$i = \frac{i' P_0^{2/3} E_{\text{exp}}^{1/3}}{c_0} \quad (\text{I.45})$$

Comprobación del valor de la sobrepresión estática:

El método de Baker tiene una exactitud limitada. En algunas condiciones, especialmente en posiciones cercanas al origen de la explosión, el método puede dar valores de sobrepresión superiores a la presión absoluta del recipiente antes del estallido (p_l), lo que es físicamente imposible. Mientras la sobrepresión estática supere a la de rotura debe tomarse $P_s = p_l$, lo que supone sobreestimar los resultados.

Etapa 4B. Cálculo de la distancia a la que se produce una determinada sobrepresión o impulso

Los umbrales escalados que definen las Zonas de Planificación son conocidos -ver capítulo 5- y corresponden a valores de la sobrepresión y del impulso escalado.

Para seleccionar el umbral correspondiente (sobrepresión o impulso) se utiliza la tabla 5.6.

El umbral seleccionado en la etapa anterior se transforma en su correspondiente escalado y se corrige dividiéndolo por los factores correspondientes de las tablas 5.9 y/o 5.10, según corresponda.

Distancias escaladas de las Zonas de Planificación:

Se determina la distancia escalada (R') correspondiente al umbral corregido del apartado anterior a partir de la figuras I.13 ó I.18, según corresponda.

Distancias de las Zonas de Planificación:

A partir de la distancia escalada del apartado anterior, se calcula la distancia de planificación utilizando la siguiente ecuación:

$$z = R' \left(\frac{E_{\text{exp}}}{P_0} \right)^{1/3} \quad \text{(I.46)}$$

I.4.2. Metodología para la determinación del alcance de los fragmentos

En este apartado se expone la metodología propuesta por *TNO (1997)* para determinar el alcance de los proyectiles, que puede llevarse a cabo mediante varios métodos que dependen del tipo de explosión. Parte de la estimación del número y masa de los fragmentos generados en el estallido del recipiente y continúa con el cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos. Si se trata de una BLEVE, la velocidad inicial debe calcularse con el método de Baum. Si es una explosión interna, una reacción fuera de control o un recipiente con gas ideal, se calcula con el método de Baker-Gelfand y se compara con el método de Moore. Por último, si se trata de la descomposición de sustancias energéticas se utiliza directamente el método de Moore, como se indica en la figura I.19.

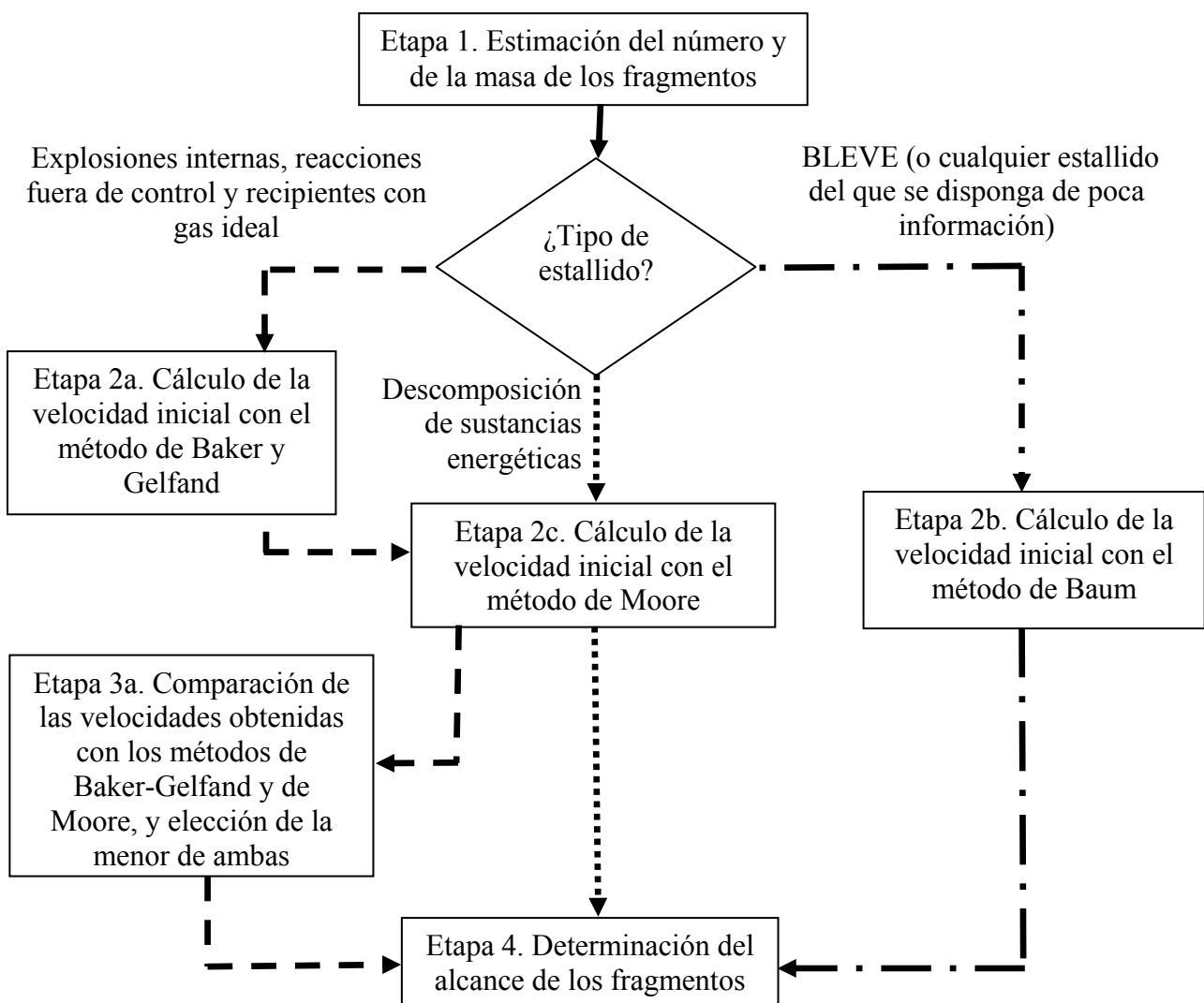


FIGURA I.19. Metodología para la determinación del alcance de fragmentos

A continuación se desarrollan las etapas indicadas en la figura I.16.

Etapa 1. Estimación del número y masa de los fragmentos

De acuerdo con lo establecido en el apartado 2.6, los resultados obtenidos en experimentos y accidentes reales demuestran que, en general, la rotura de los recipientes depende de las causas que la produzcan y de la geometría del contenedor. En la tabla I.12 se recogen las situaciones que deben considerarse en cada caso.

TABLA I.12. Estimación del número de fragmentos

Causa del estallido		Número de fragmentos (n_f)
Debilitamiento local (corrosión, desgaste, etc).	Cilindro	2 desiguales
	Esfera	5 iguales
Sobrepresión	Cilindro	Varias posibilidades (Nota 1): 2 desiguales / 3 desiguales / 20 desiguales
	Esfera	Varios (de 3 a 20, preferentemente 10)

Nota 1: Ver figuras 2.13 y 2.14 en el capítulo 2.

La forma de estimar la masa de los fragmentos en función de la masa del recipiente (M_V) en cada una de las situaciones anteriores se indica en la tabla I.13 (TNO, 1997).

TABLA I.13. Estimación de la masa y forma de los fragmentos

Tipo de recipiente	Número de fragmentos, n_f	Masa del fragmento, M_f	Forma de los fragmentos
Esfera	5 iguales	$M_V/5$	Prácticamente planos
	10 iguales	$M_V/10$	Prácticamente planos
Cilindro	2 fragmentos desiguales	Uno: M_{tapa}	Semiesférico
		El otro: $(M_V - M_{tapa})$	Tanque sin tapa (tipo cohete)
	3 fragmentos	2 trozos: M_{tapa}	Semiesféricos
		El otro: $(M_V - 2M_{tapa})$	Cuerpo cilíndrico (carcasa) abierto y casi plano
	Múltiples fragmentos (2 tapas + 18 tiras)	2 trozos: M_{tapa}	Semiesféricos
		El resto: $\frac{(M_V - 2M_{tapa})}{18}$	Tiras alargadas

De acuerdo con los cálculos efectuados en distintos supuestos y el análisis de accidentes del anexo III, el fragmento tipo cohete suele sobreestimar considerablemente la distancia, por lo que no se tiene en cuenta para el cálculo del alcance máximo. Por lo tanto, se consideran todas las geometrías indicadas en la tabla I.13, excepto el tanque sin tapa. En estas condiciones, el fragmento que suele determinar el alcance máximo es el extremo semiesférico (tapa) y *Hauptmanns (2001a)* considera dicha geometría para analizar los alcances de varios estallidos de recipientes con formación de fragmentos, obteniendo resultados que se ajustan adecuadamente a dichos accidentes.

Siguiendo la secuencia de la figura I.19, una vez estimado el número de fragmentos y la masa de los mismos, se debe continuar en etapas diferentes, dependiendo del tipo de estallido. Si se trata de una BLEVE, seguir en la etapa 2a; en el caso de rotura por descomposición de sustancias energéticas, pasar a la 2c, mientras que para cualquier tipo de estallido diferente de los anteriores, continuar en la 2b.

Etapa 2a. Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos con el método de Baker y Gelfand (para explosiones internas, reacciones fuera de control y recipientes con gas ideal).

En primer lugar, se determina la velocidad del sonido en el gas comprimido en el momento inmediatamente anterior al estallido (c_1 , m/s) mediante la siguiente expresión:

$$c_1^2 = \frac{T_g \gamma_1 R}{\mu_1} \quad (\text{I.47})$$

donde:

γ_1 : C_P/C_V del gas (adimensional).

T_g : Temperatura absoluta del gas comprimido (K).

μ_1 : Masa molecular del gas (kg/mol).

R : Constante universal de los gases (8.314 J/(mol·K)).

A continuación se calcula la sobrepresión escalada (P'_1 , adimensional) mediante:

$$P'_1 = \frac{(p_1 - P_0) V_g}{M_V c_1^2} \quad (\text{I.48})$$

donde p_l (Pa) es la presión absoluta en el interior del recipiente en el momento inmediatamente anterior al estallido; P_0 (Pa) es la presión atmosférica y V_g (m³) el volumen de gas en el interior del recipiente.

Si el estallido es debido a una reacción fuera de control o a una explosión interna, debe calcularse además el parámetro adimensional Φ , que caracteriza la velocidad de liberación de energía.

$$\Phi = \frac{\Delta H_{\text{exp}} S_L}{c_1^3} \quad (\text{I.49})$$

donde ΔH_{exp} (J/kg) es la entalpía de la reacción explosiva o fuera de control y S_L (m/s) la velocidad laminar de combustión (ver tabla I.8 en el apartado I.3.1).

Una vez calculados los parámetros anteriores, se determina la velocidad inicial de los fragmentos (v_i) a partir del cociente v_i/c_1 , obtenido de una de las figuras I.20 a I.25 (TNO, 1997), seleccionada a partir de las indicaciones recogidas en la tabla I.14.

TABLA I.14. Selección de la figura a utilizar en función de la geometría del recipiente, el tipo de estallido y los parámetros característicos

Geometría del recipiente	Tipo de estallido	Parámetro característico	Figura a utilizar	
Esférico	Gas ideal		I.20	
	Reacción fuera de control o explosión interna	$\gamma_1 = 1.7$	I.21a	
		$\gamma_1 = 1.4$	I.21b	
		$\gamma_1 = 1.1$	I.21c	
Cilíndrico	Gas ideal	$L_V/d_V = 5$	I.22	
		$L_V/d_V = 10$	I.23	
	Reacción fuera de control o explosión interna	$L_V/d_V = 5$	$\gamma_1 = 1.7$	I.24a
			$\gamma_1 = 1.4$	I.24b
			$\gamma_1 = 1.1$	I.24c
		$L_V/d_V = 10$	$\gamma_1 = 1.7$	I.25a
			$\gamma_1 = 1.4$	I.25b
			$\gamma_1 = 1.1$	I.25c

Nota: L_V y d_V son la longitud y diámetro del cilindro, respectivamente.

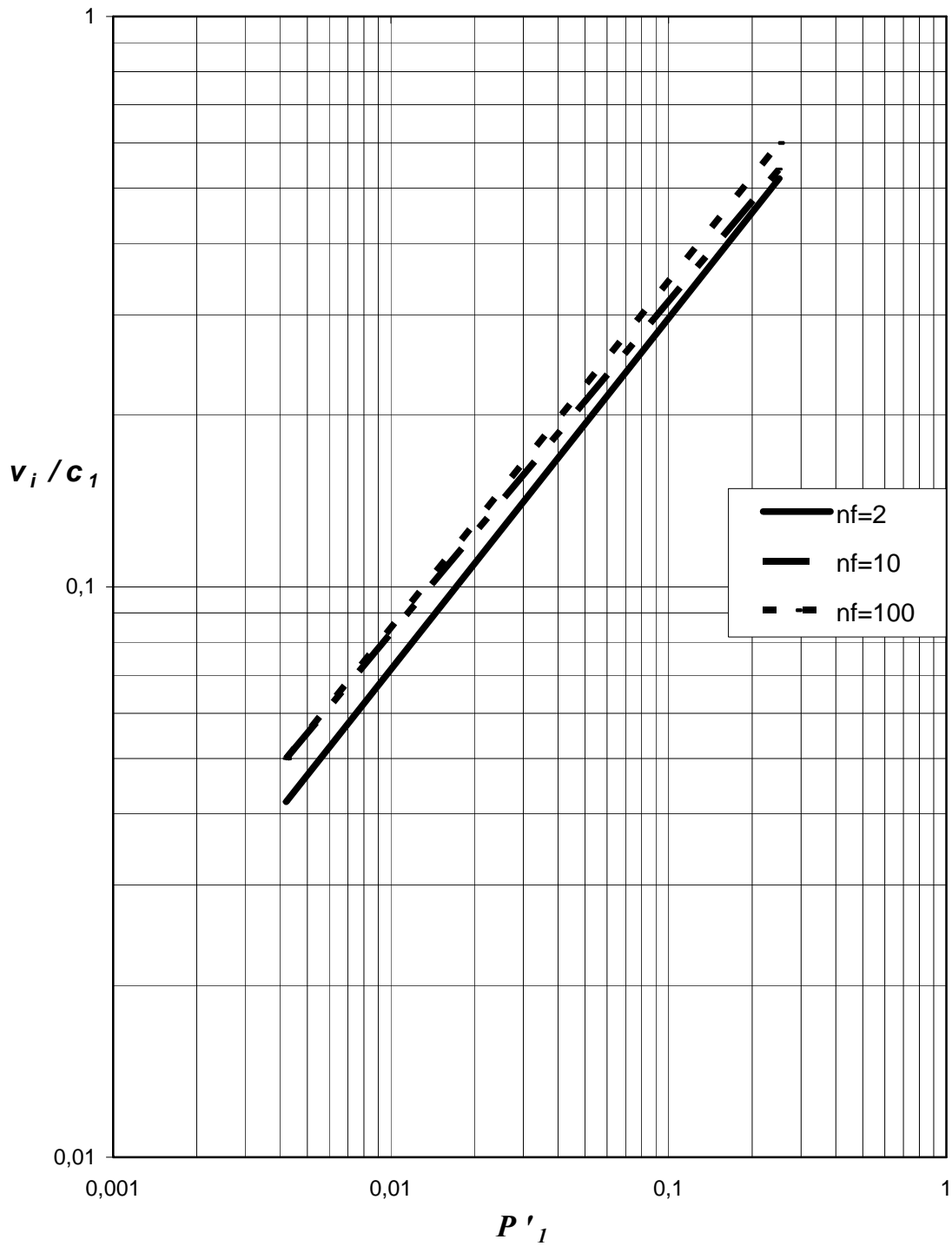


FIGURA I.20. Velocidad de los fragmentos con relación a la del sonido en función de la presión escalada (adimensional) para recipientes esféricos con gas ideal (nf: número de fragmentos).

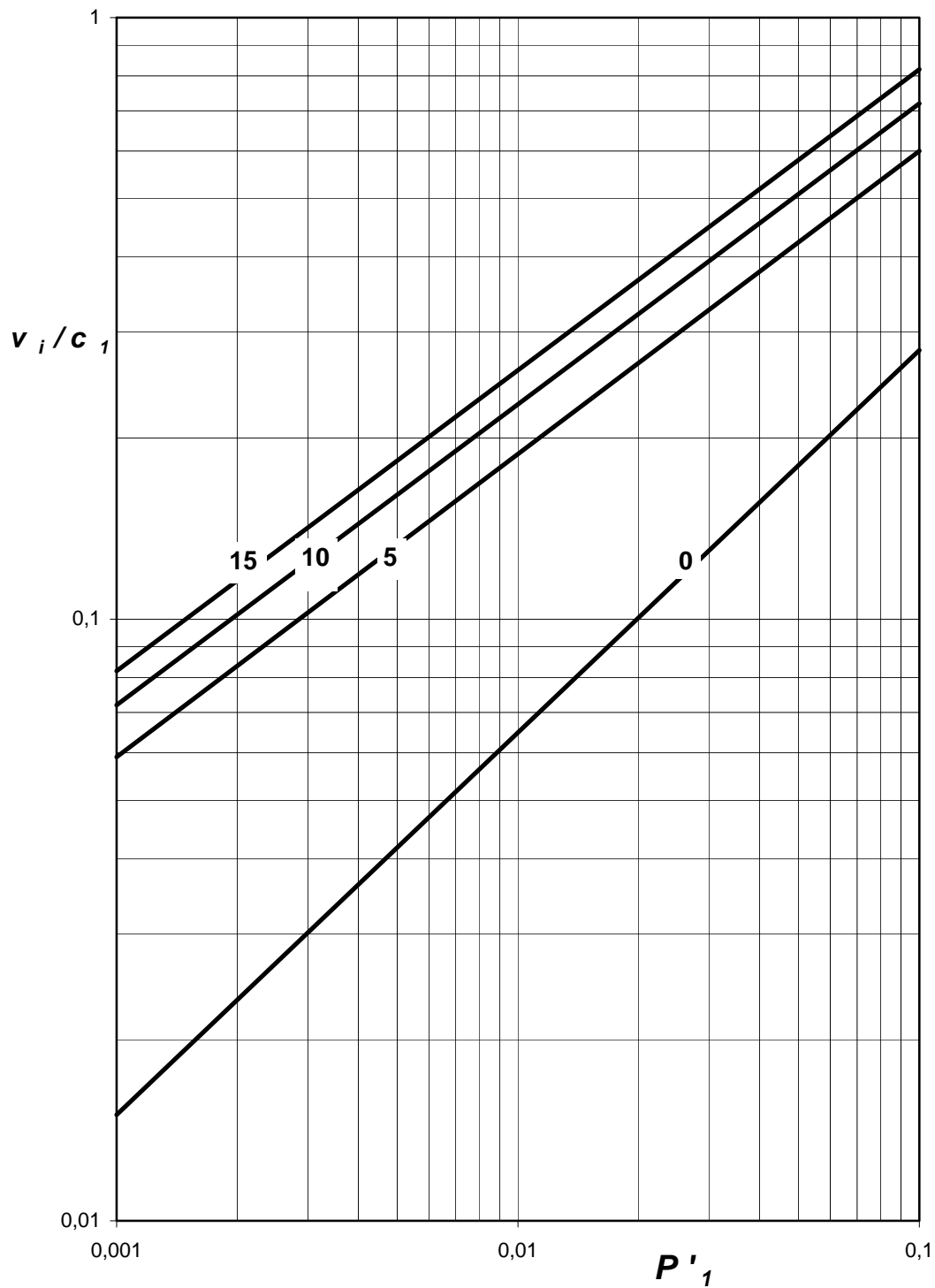


FIGURA I.21a. Velocidad de los fragmentos con relación a la del sonido en función de la presión escalada (adimensional) para recipientes esféricos cuya rotura se produzca como consecuencia de una reacción fuera de control o de una explosión interna, para $\gamma_1 = 1.7$ y distintos valores de Φ (I.49).

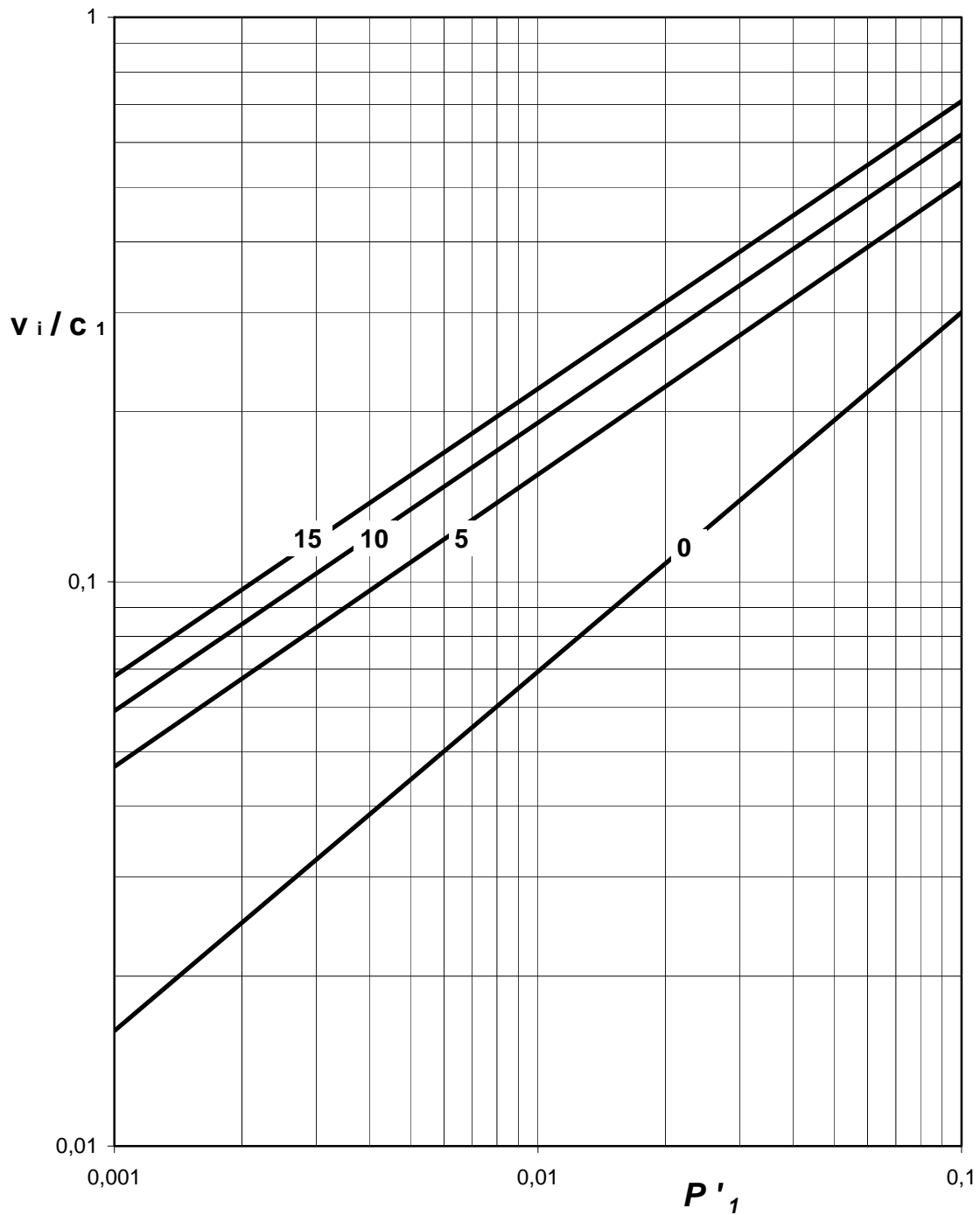


FIGURA I.21b. Velocidad de los fragmentos con relación a la del sonido en función de la presión escalada (adimensional) para recipientes esféricos cuya rotura se produzca como consecuencia de una reacción fuera de control o de una explosión interna, para $\gamma_1 = 1.4$ y distintos valores de Φ (I.49).

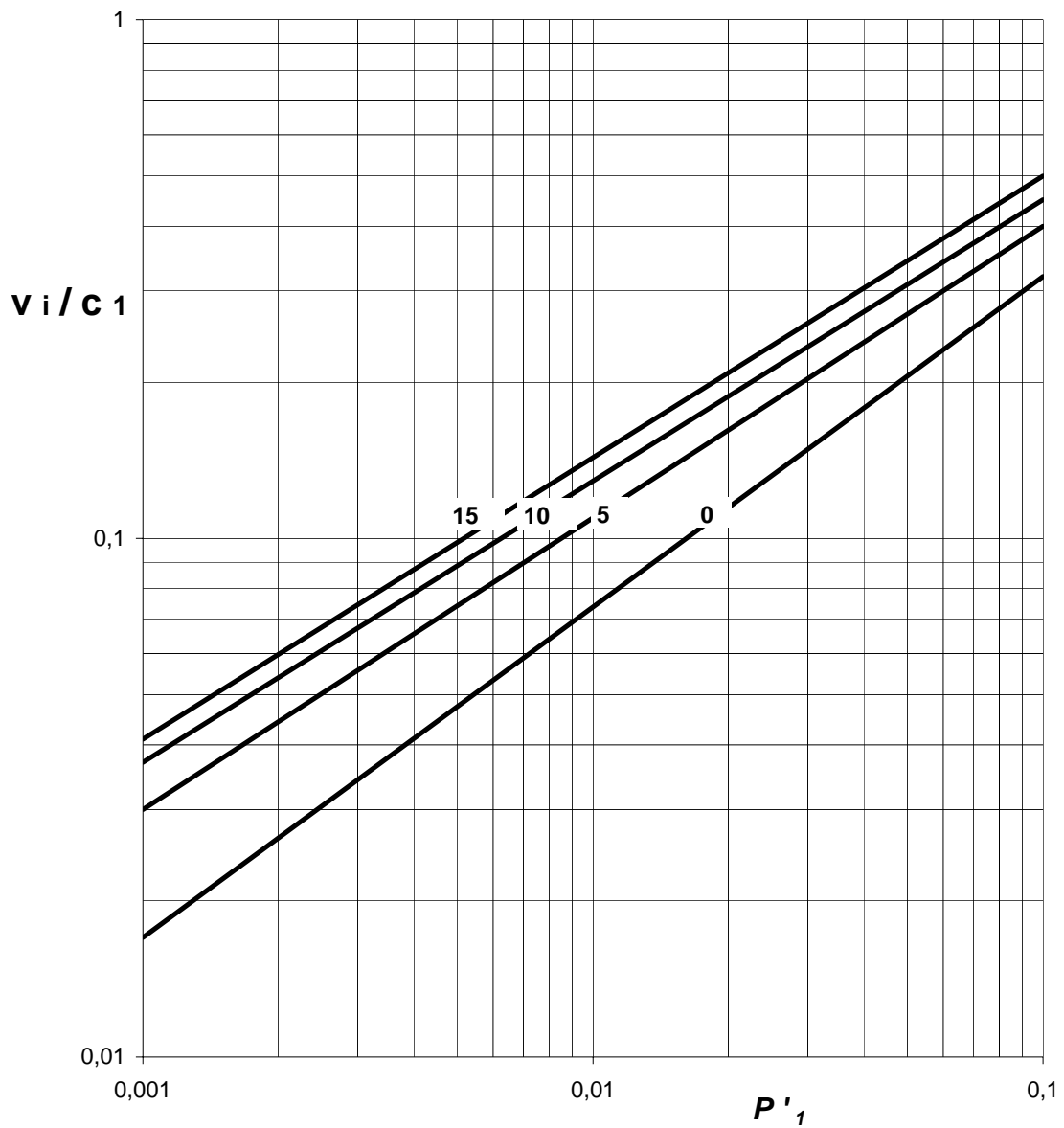


FIGURA I.21c. Velocidad de los fragmentos con relación a la del sonido en función de la presión escalada (adimensional) para recipientes esféricos cuya rotura se produzca como consecuencia de una **reacción fuera de control o de una explosión interna**, para $\gamma_1 = 1.1$ y distintos valores de Φ (I.49).

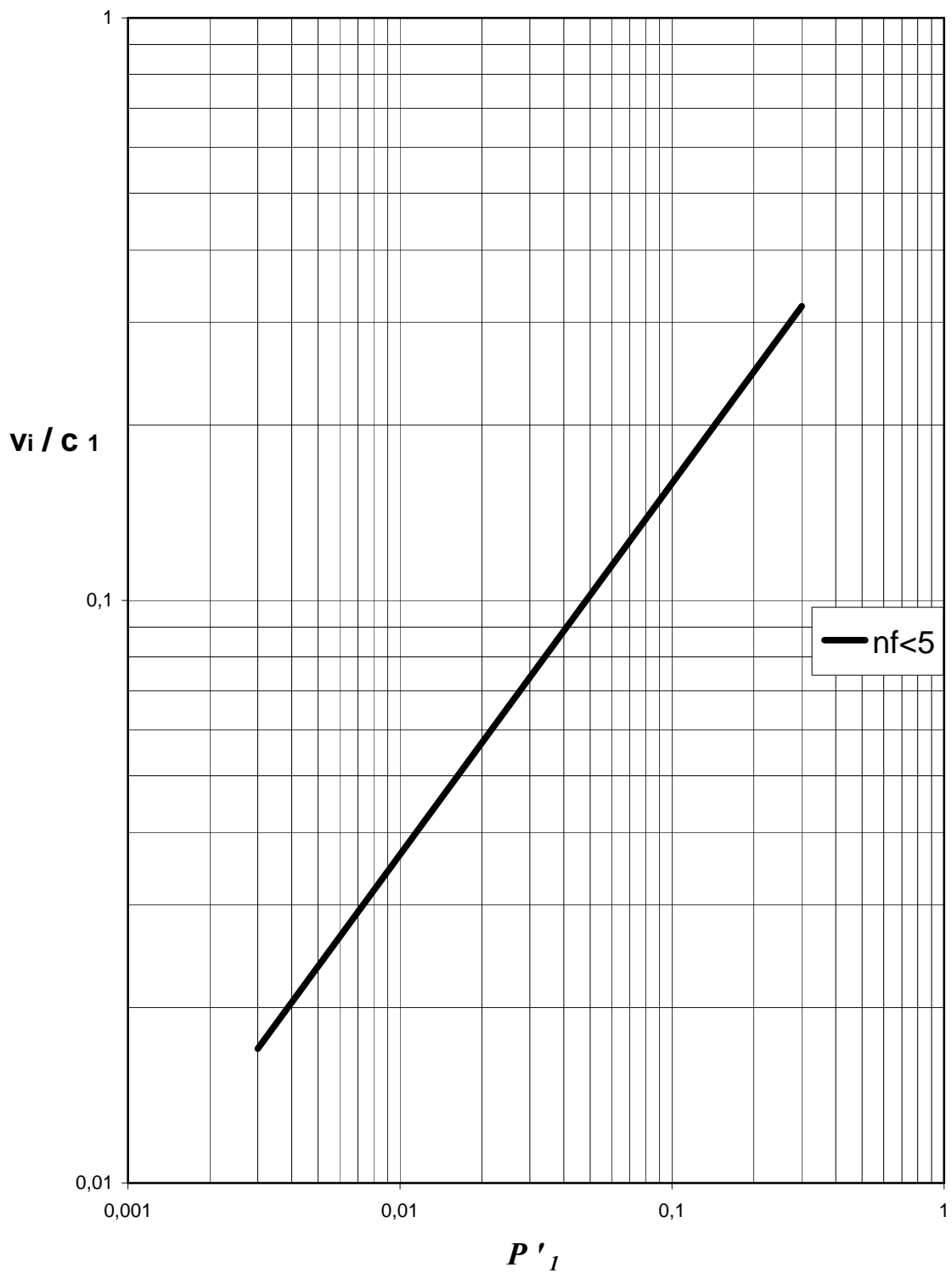


FIGURA I.22. Velocidad de los fragmentos con relación a la del sonido en función de la presión escalada (adimensional) para cilindros con gas ideal y una relación longitud / diámetro (L_V/d_V) de 5 (nf: número de fragmentos).

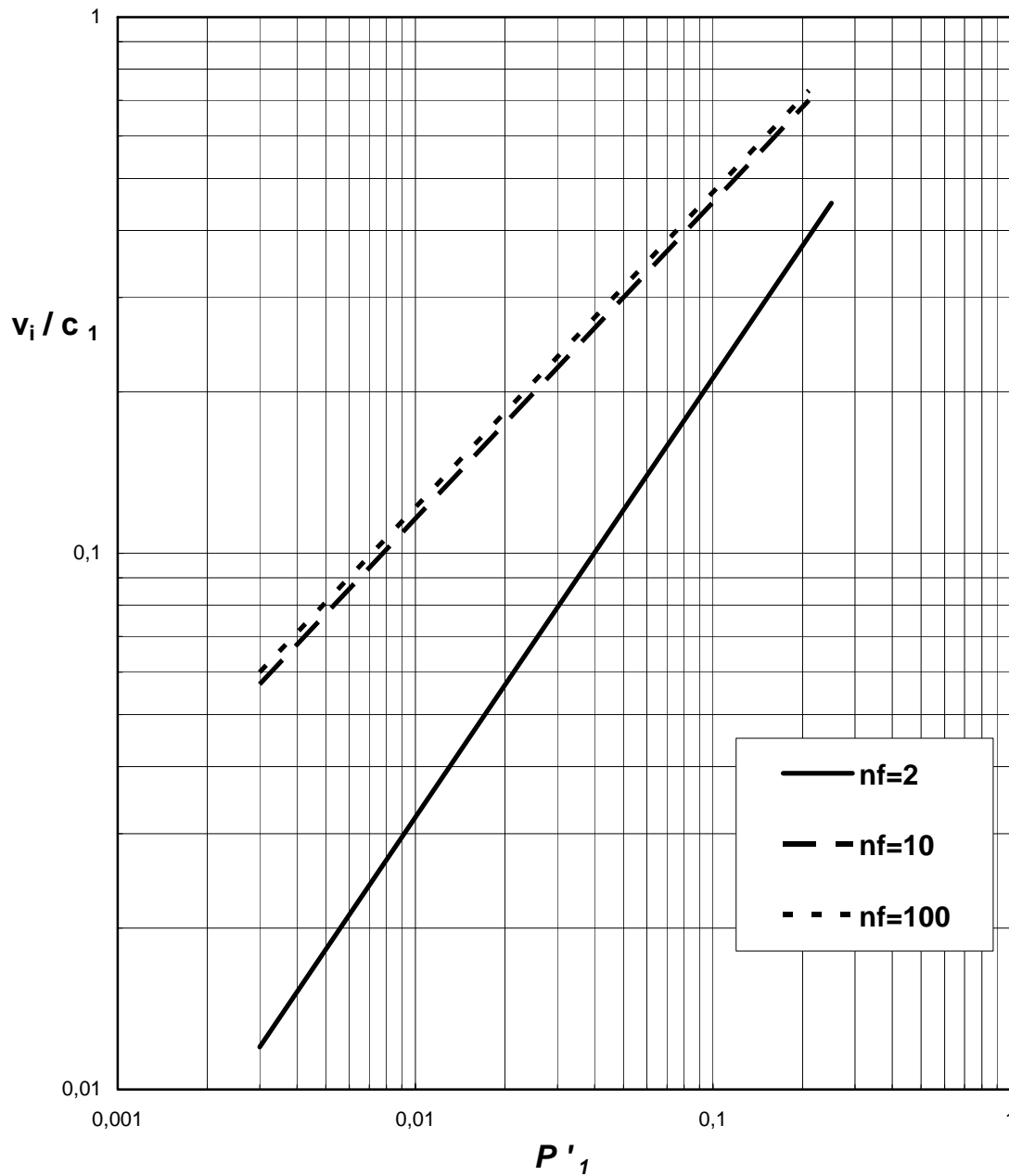


FIGURA I.23. Velocidad de los fragmentos con relación a la del sonido en función de la presión escalada (adimensional) para cilindros con gas ideal y una relación longitud / diámetro (L_V/d_V) de 10 (nf: número de fragmentos).

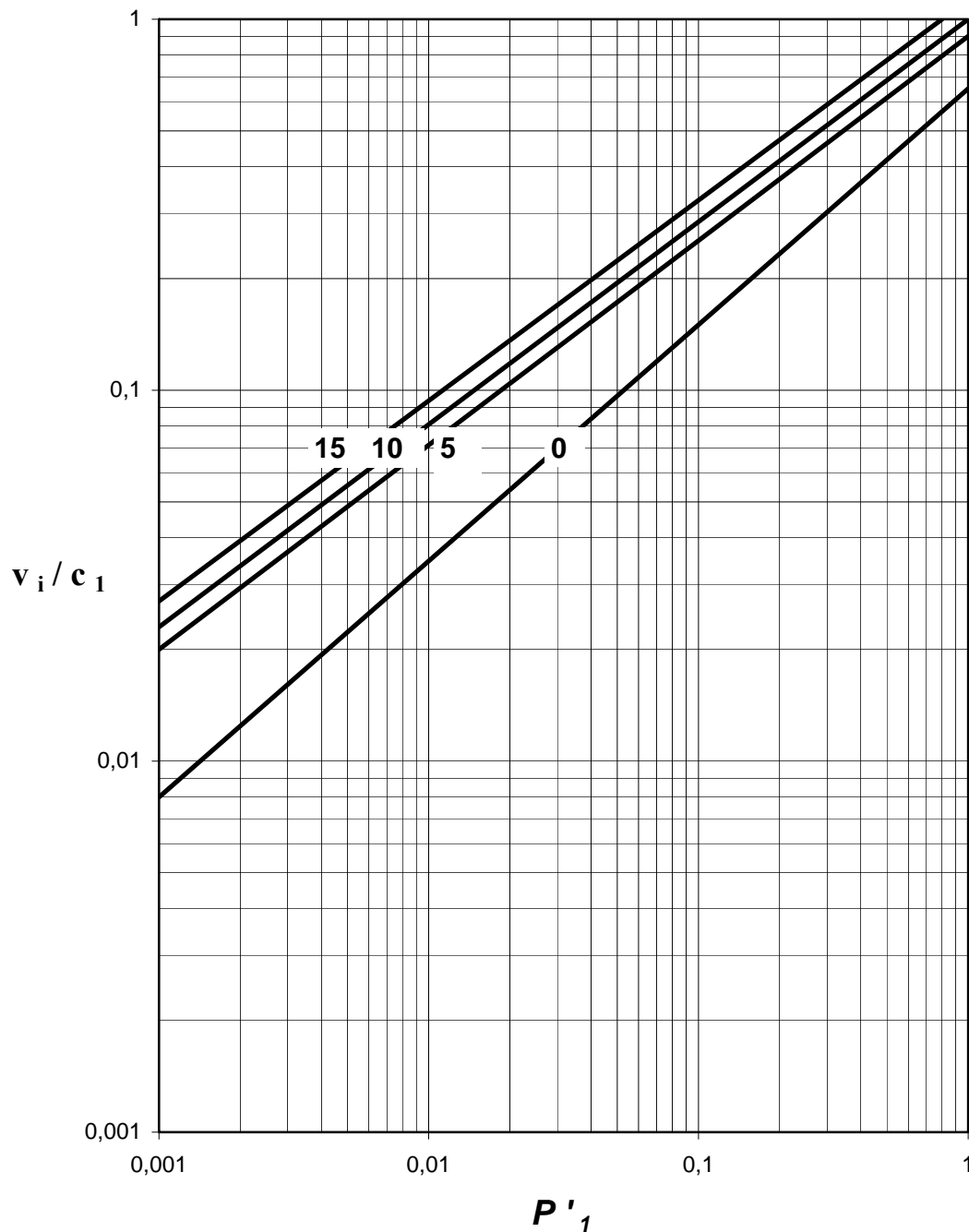


FIGURA I.24a. Velocidad de los fragmentos con relación a la del sonido en función de la presión escalada (adimensional) para recipientes cilíndricos con una relación longitud / diámetro (L_V / d_V) de 5 y cuya rotura se produzca como consecuencia de una reacción fuera de control o de una explosión interna, para $\gamma_1 = 1.7$ y distintos valores de Φ (I.49).

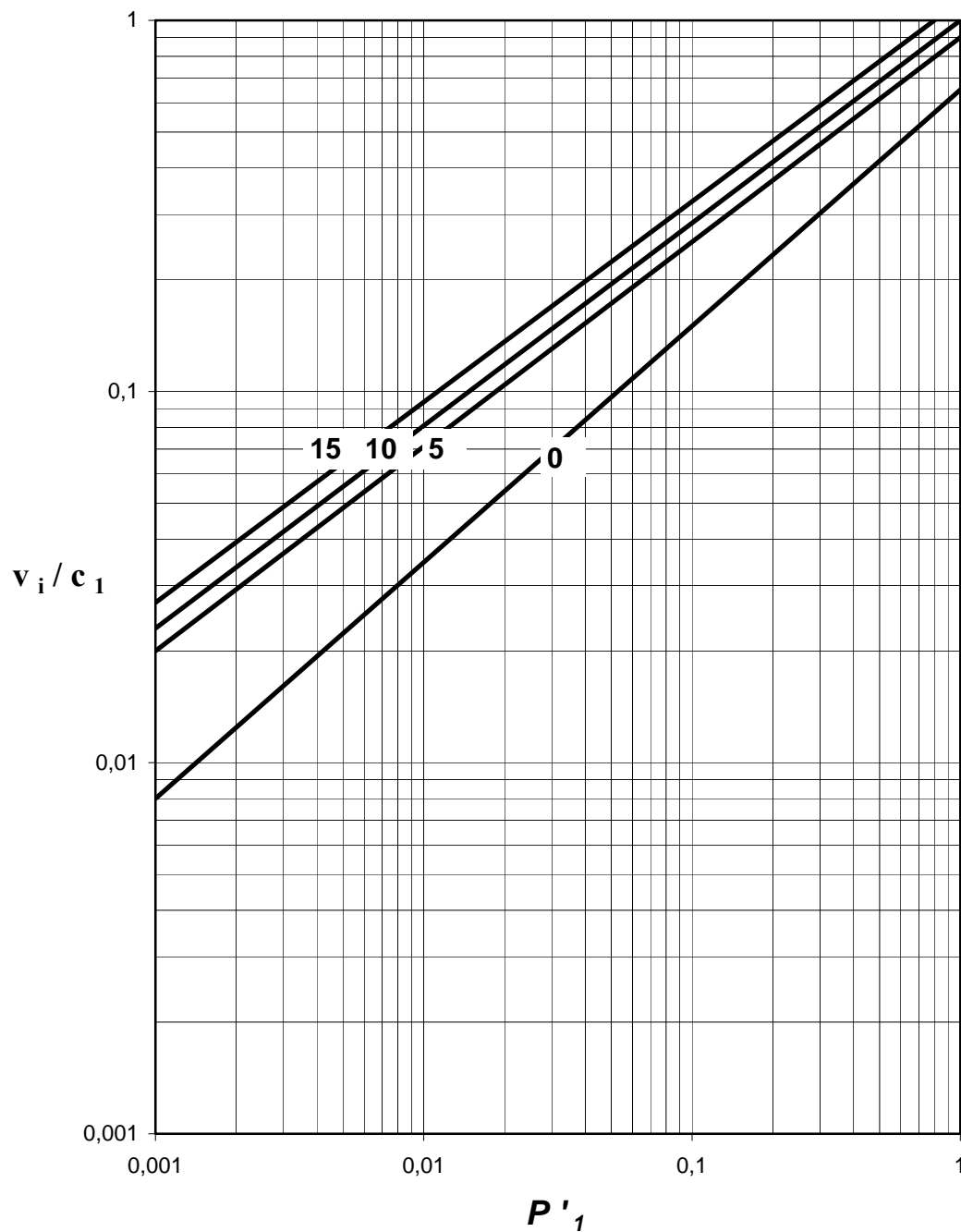


FIGURA I.24b. Velocidad de los fragmentos con relación a la del sonido en función de la presión escalada (adimensional) para **recipientes cilíndricos** con una relación longitud / diámetro (L_V / d_V) de 5 y cuya rotura se produzca como consecuencia de una **reacción fuera de control o de una explosión interna**, para $\gamma_1 = 1.4$ y distintos valores de Φ (I.49).

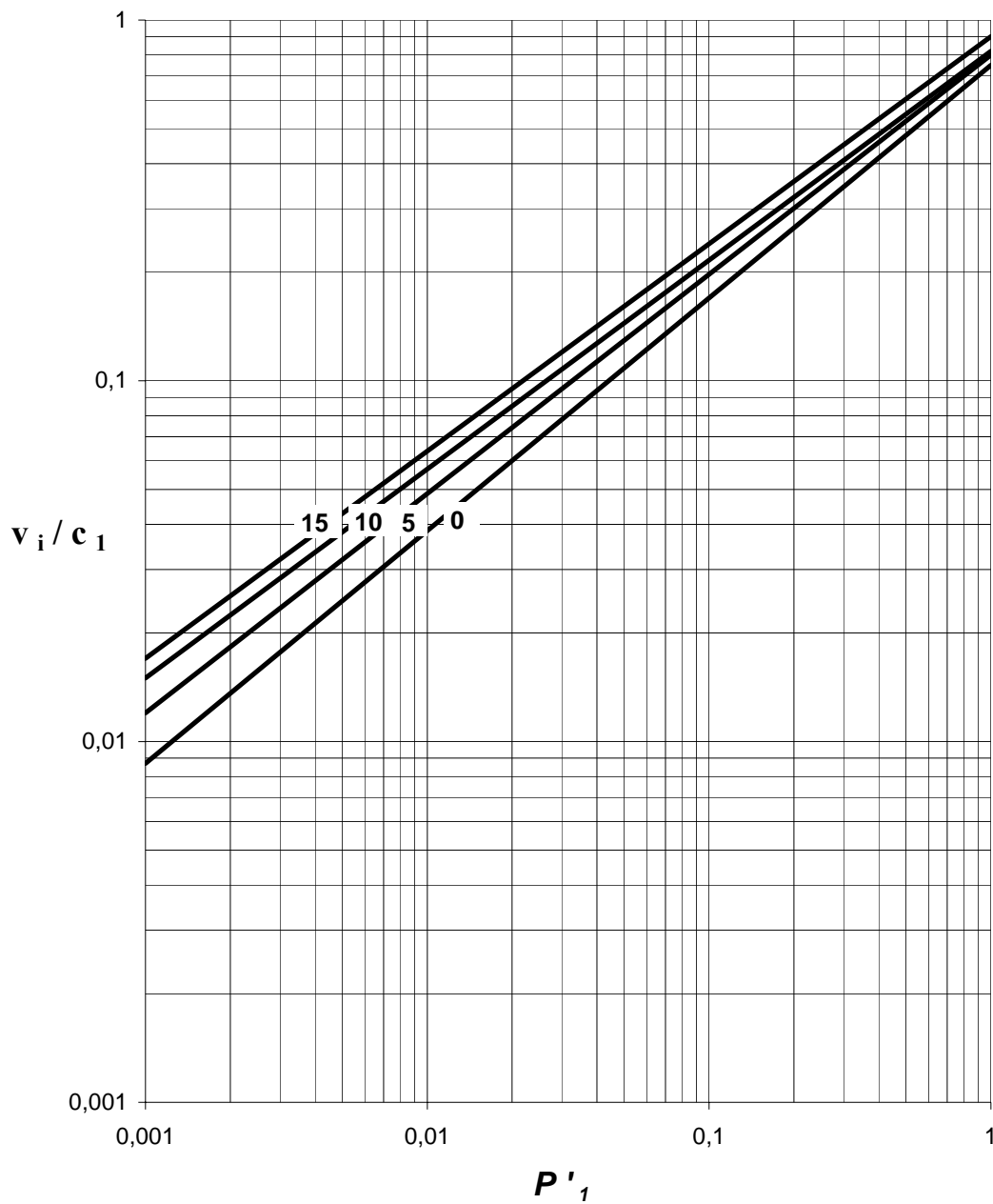


FIGURA I.24c Velocidad de los fragmentos con relación a la del sonido en función de la presión escalada (adimensional) para **recipientes cilíndricos** con una relación longitud / diámetro (L_V / d_V) de 5 y cuya rotura se produzca como consecuencia de una reacción fuera de control o de una explosión interna, para $\gamma_1 = 1.1$ y distintos valores de Φ (I.49).

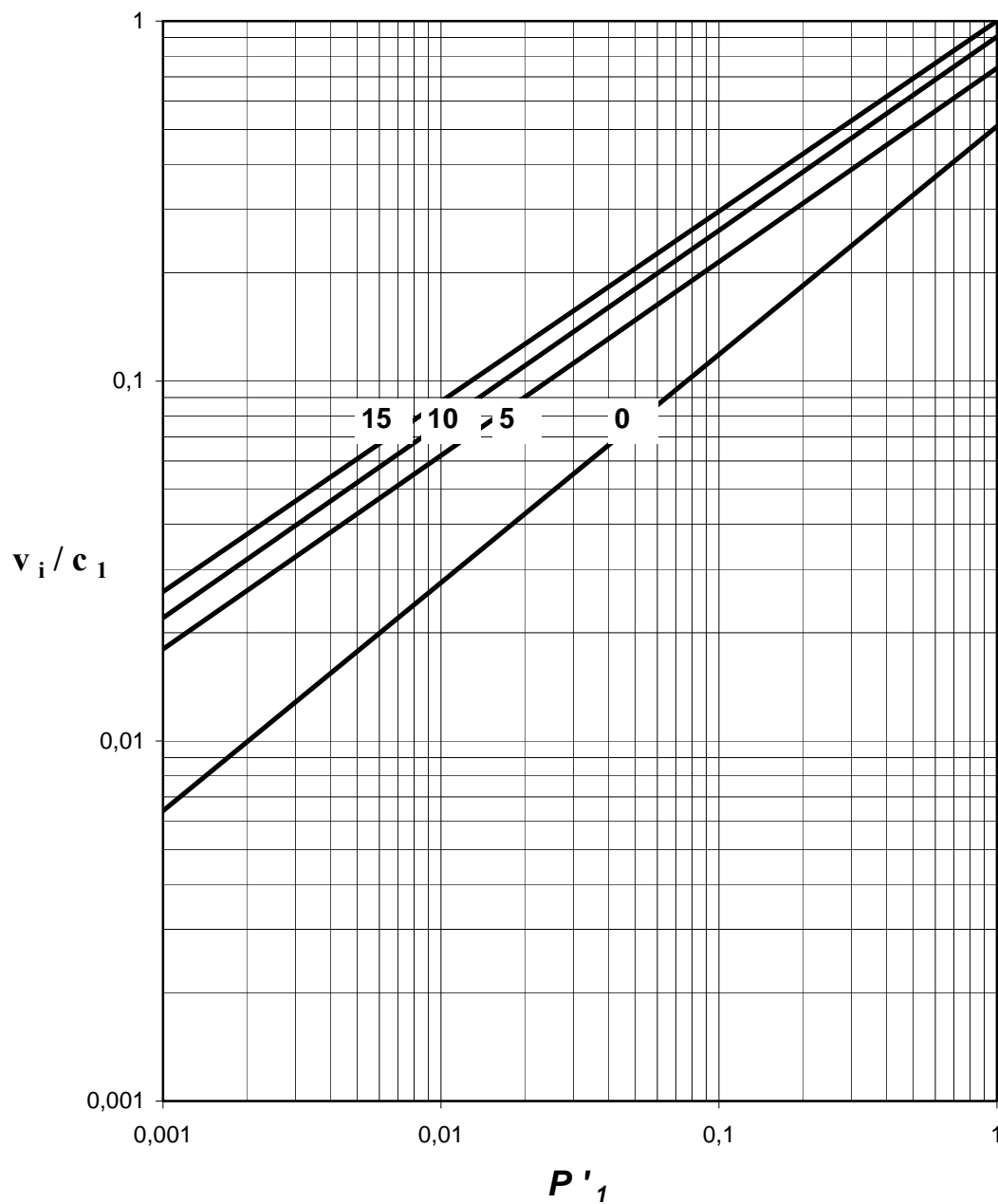


FIGURA I.25a. Velocidad de los fragmentos con relación a la del sonido en función de la presión escalada (adimensional) para **recipientes cilíndricos** con una relación **longitud / diámetro (L_V / d_V)** de 10 y cuya rotura se produzca como consecuencia de una **reacción fuera de control o de una explosión interna**, para $\gamma_1 = 1.7$ y distintos valores de Φ (I.49).

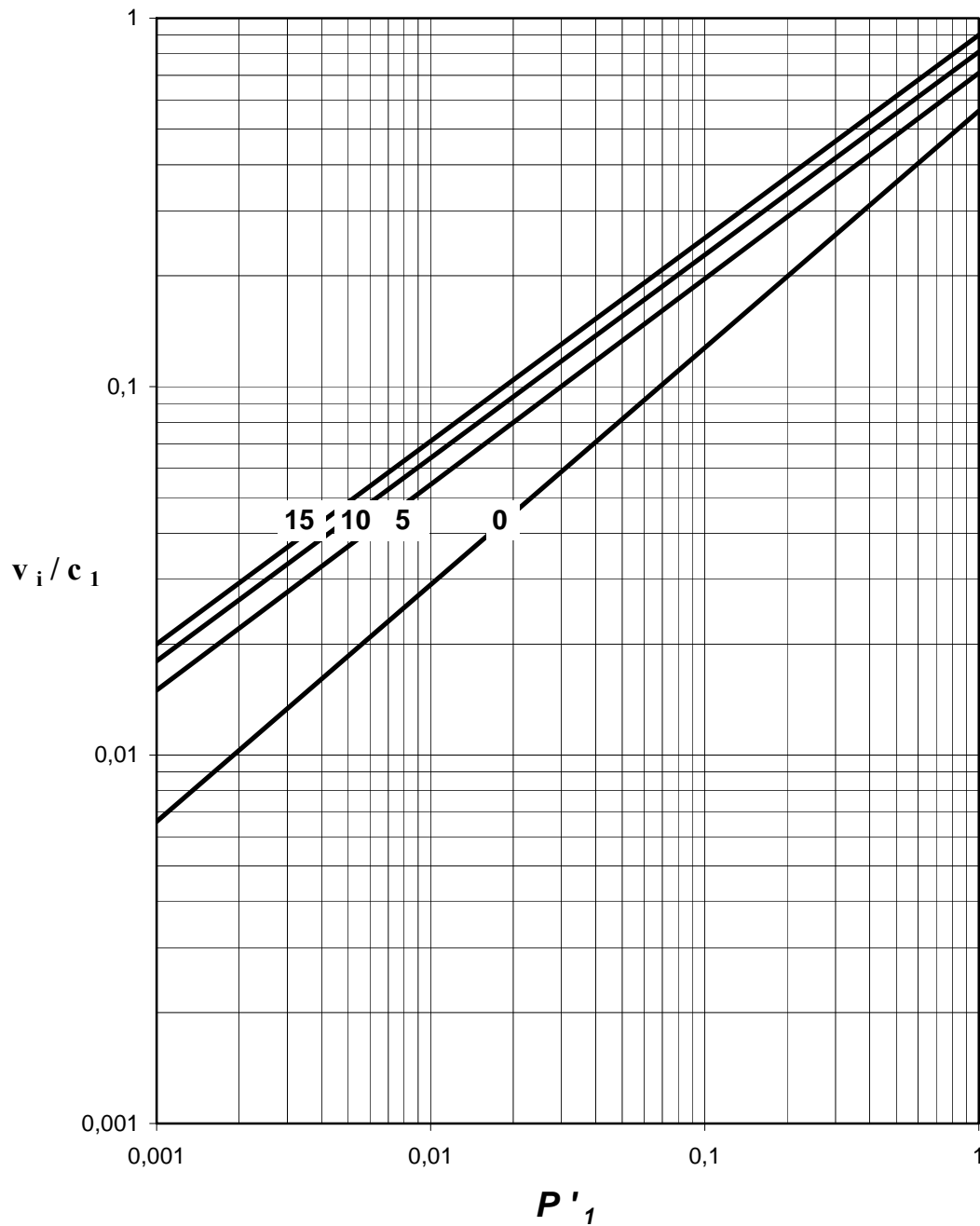


FIGURA I.25b. Velocidad de los fragmentos con relación a la del sonido en función de la presión escalada (adimensional) para recipientes cilíndricos con una relación longitud / diámetro (L_V/d_V) de 10 y cuya rotura se produzca como consecuencia de una reacción fuera de control o de una explosión interna, para $\gamma_1 = 1.4$ y distintos valores de Φ (I.49).

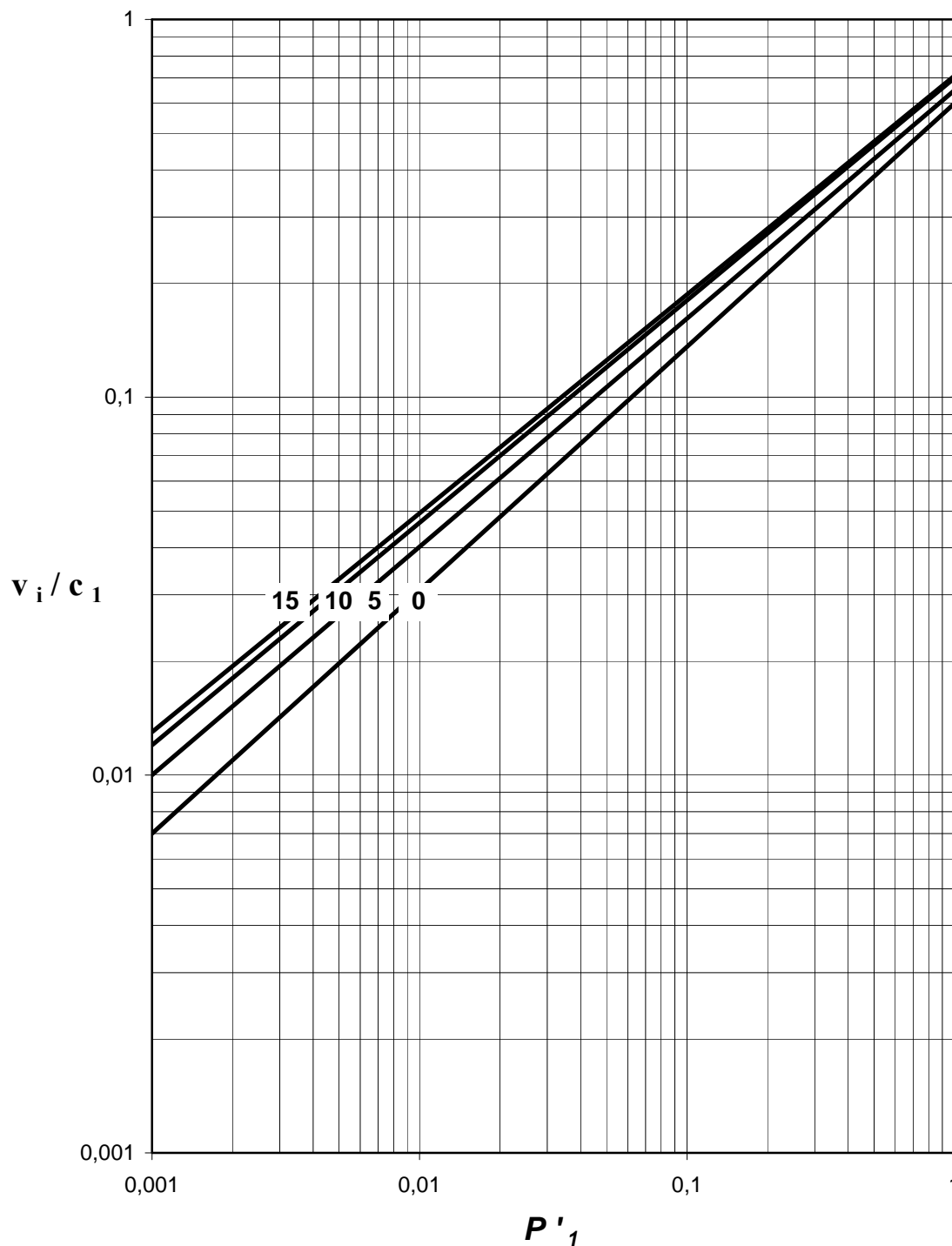


FIGURA I.25c. Velocidad de los fragmentos con relación a la del sonido en función de la presión escalada (adimensional) para **recipientes cilíndricos** con una relación **longitud / diámetro (L_V / d_V)** de 10 y cuya rotura se produzca como consecuencia de una **reacción fuera de control o de una explosión interna**, para $\gamma_1 = 1.1$ y distintos valores de Φ (I.49).

Etapa 2b. Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos con el método de Baum (para el caso de BLEVEs o estallidos con poca información).

La energía cinética comunicada a los fragmentos es una fracción (A_{ke}) de la energía total liberada (E_{av}), esto es:

$$\frac{1}{2} M_v v_i^2 = A_{ke} E_{av} \quad (\text{I.50})$$

Siendo v_i (m/s) la velocidad inicial de los fragmentos, por consiguiente:

$$v_i = \sqrt{\frac{2 A_{ke} E_{av}}{M_v}} \quad (\text{I.51})$$

Para BLEVEs, *TNO (1997)* recomienda utilizar un valor de A_{ke} de 0.04. En cualquier otro caso, *TNO (1997)*, *Lees (1996)*, *CCPS (1994)*, citado por *Hauptmanns (2001)* aconsejan utilizar 0.2. La energía liberada (E_{av} , J) se obtiene a partir del método de Baker (apartado I.4.1, casos 2.1 a 2.3).

Etapa 2c. Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos con el método de Moore.

Como se indica en la figura I.19, el método de Moore es específico para la rotura de recipientes debida a la descomposición de sustancias energéticas, pero debe utilizarse también para comparar la velocidad inicial obtenida con el método de Baker-Gelfand, seleccionando la menor. El método de Moore suele sobreestimar la velocidad por lo que, en general, se toma la calculada por el de Baker-Gelfand.

La velocidad inicial de los fragmentos (v_i , m/s) del método de Moore se calcula mediante la ecuación siguiente:

$$v_i = 1.092 \left(\frac{E_{av}}{M_v} \right)^{0.5} \quad (\text{I.52})$$

La energía liberada (E_{av} , J) se calcula mediante el método de Baker (apartado I.4.1, casos 2.1 a 2.3).

Etapa 3a. Elección de la velocidad inicial adecuada.

En el caso de estallidos producidos por la descomposición de sustancias energéticas, se utiliza directamente la velocidad obtenida con el método de Moore.

En los estallidos calculados con el método de Baker-Gelfand se procede a la comparación de la velocidad, como se ha indicado anteriormente, y se toma la menor.

Etapa 4. Determinación del alcance de los fragmentos.

A partir de la velocidad seleccionada en la etapa anterior (v_i , m/s), se obtiene la velocidad inicial escalada (v'_i , adimensional) mediante:

$$v'_i = \frac{\rho_0 C_D A_D v_i^2}{M_f g} \quad (\text{I.53})$$

donde:

- ρ_0 : Densidad del aire ambiente (1.2 kg/m³, aproximadamente).
 C_D : Coeficiente de rozamiento (adimensional).
 A_D : Área del fragmento en un plano perpendicular a la trayectoria (m²).

El producto $C_D A_D$, denominado factor de rozamiento, depende del tamaño y forma del fragmento y de su posición durante el vuelo, indicándose en la tabla I.15 los valores más habituales. Como el movimiento del fragmento en el aire se desconoce a priori, el criterio recomendado es suponer que se mueven cambiando de posición, girando, ya que ésta es la situación más realista y proporciona resultados adecuados en relación a los accidentes analizados (anexo III).

TABLA I.15. Factor de rozamiento $C_D A_D$ para diferentes tipos de fragmentos (TNO, 1997)

Fragmento	$C_D A_D$ (m ²)
Plano	$0.585 \times A_{\text{fragmento}}$
Semiesférico	$0.615 \times \frac{\pi}{4} d_V^2$
Alargado	$0.99 \times A_{\text{fragmento}}$

$A_{\text{fragmento}}$ (m²) es el área exterior o de una de las caras (para los de forma plana o alargada) y d_V (m) el diámetro del recipiente.

Una vez calculada la velocidad inicial escalada, se obtiene el alcance escalado de los fragmentos (R'_f , adimensional) a partir de la figura I.26, que ha sido obtenida a partir de la propuesta por TNO (1997). Debe indicarse que la figura original presenta varias curvas, pero la propuesta aquí seguida está simplificada al eliminar los parámetros no significativos y contemplar la situación más conservadora.

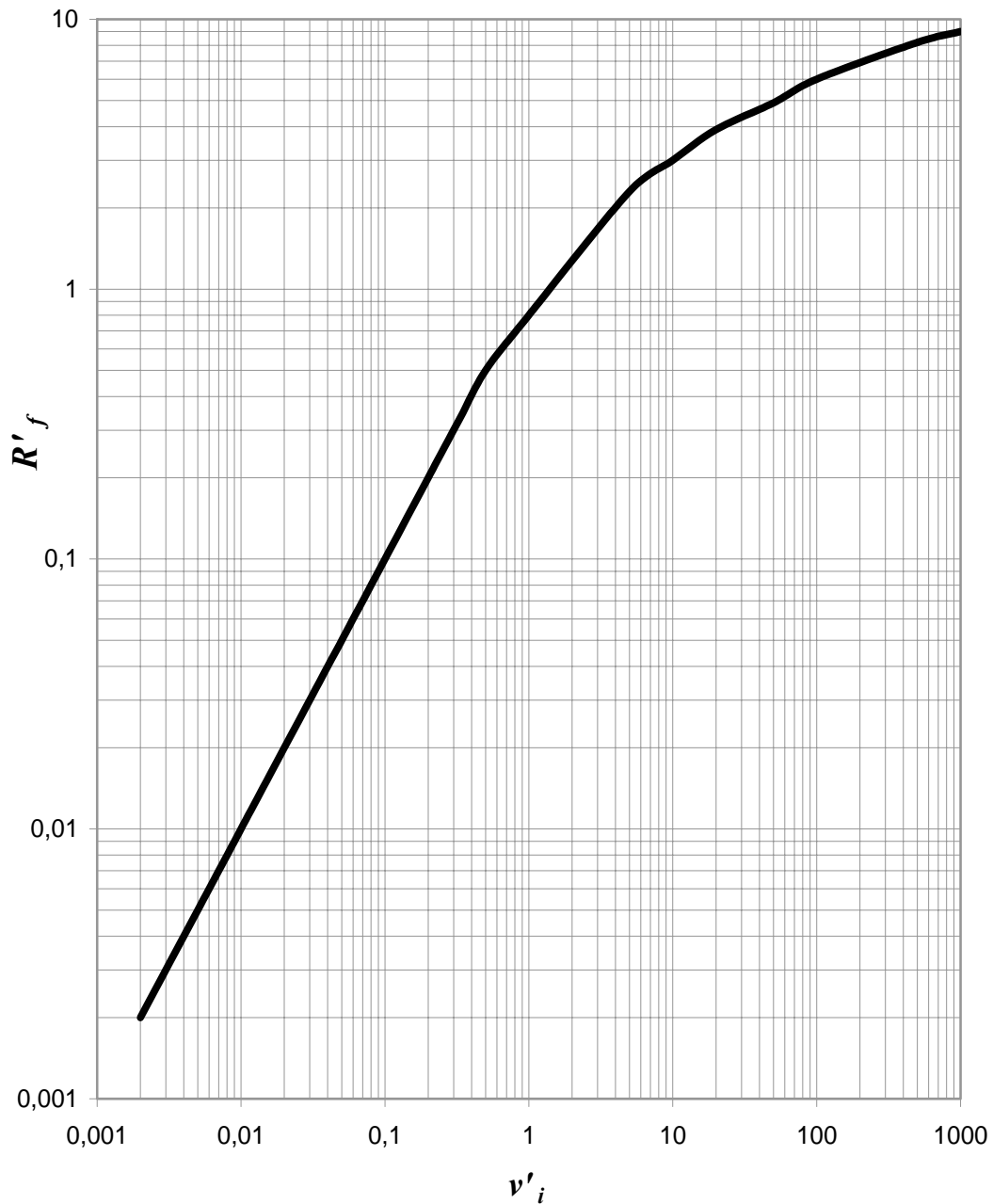


FIGURA I.26. Alcance escalado de los fragmentos frente a velocidad escalada inicial

El valor de R'_f así obtenido debe ser transformado en el correspondiente alcance de los fragmentos R_f (metros) mediante la ecuación:

$$R_f = R'_f \frac{M_f}{\rho_0 C_D A_D} \quad (I.54)$$

La etapa 4 debe repetirse para cada uno de los diferentes fragmentos generados en la explosión. La distancia que debe tomarse a efectos de planificación es la mayor, tal y como se comenta en el capítulo 5.

ANEXO II. EJEMPLOS DE CÁLCULO

Se aplican las metodologías seleccionadas de cálculo a cuatro ejemplos típicos para contribuir a la mejor comprensión de los procedimientos para determinar las magnitudes peligrosas y las Zonas de Planificación.

II.1. EJEMPLO PARA SUSTANCIAS EXPLOSIVAS

II.1.1. Aplicación del método TNT equivalente a una explosión de clorato sódico

Se sigue el procedimiento descrito en el apartado I.2.1.

II.1.1.1. Escenario

Sustancia: Clorato sódico comercial almacenado en un silo.
Masa implicada: 300 Tm.

II.1.1.2. Aplicación del procedimiento

Etapas 1 y 2. Determinación de la energía liberada en la explosión y estimación del valor de la eficiencia de la explosión (α)

Dado que se trata de una sustancia explosiva cuya relación ($W_{TNT}/W_{Explosivo}$) es conocida, se comienza en la etapa 3.

Etapas 3. Cálculo de la masa de TNT equivalente (W_{TNT} , kg)

En la tabla I.5 se indica la equivalencia TNT / clorato sódico,

$$(W_{TNT}/W_{Explosivo})_{Clorato\ sódico} = 0.15 \quad (\text{II.1})$$

utilizando la ecuación I.10 se obtiene la masa de TNT equivalente (W_{TNT}):

$$W_{TNT} = W_{Explosivo} \left(\frac{W_{TNT}}{W_{Explosivo}} \right)_{Clorato\ sódico} = 300000 \cdot 0.15 = 45000 \text{ kg} \quad (\text{II.2})$$

Para determinar las Zonas de Planificación se debe continuar en el apartado II.1.2. No obstante, se incluye a modo de ejemplo el cálculo de los parámetros característicos de la onda de presión a una distancia determinada.

Etapa 4A. Determinación de los parámetros característicos de la explosión a una determinada distancia

Cálculo de la distancia escalada (z'):

Para cada punto alejado una distancia z del origen de la explosión se determina la denominada distancia escalada, mediante la ecuación I.5. La distancia supuesta es 500 m:

$$z' = \frac{z}{W_{TNT}^{1/3}} = \frac{500}{45000^{1/3}} = 14.06 \text{ m/kg}^{1/3} \quad (\text{II.3})$$

Parámetros de la onda:

Para $z' = 14.06 \text{ m/kg}^{1/3}$ se determina la sobrepresión P_s (figura I.2) y el impulso escalado i_{TNT} (figura I.3)

$$P_s = 9000 \text{ Pa}$$

$$i_{TNT} = 20 \text{ Pa}\cdot\text{s/kg}^{1/3}$$

El impulso mecánico, i , se obtiene a partir de la ecuación I.11:

$$i = i_{TNT} W_{TNT}^{1/3} = 20 \cdot 45000^{1/3} = 711 \text{ Pa}\cdot\text{s} \quad (\text{II.4})$$

II.1.2. Cálculo de las Zonas de Planificación

Las Zonas de Planificación se determinan siguiendo el procedimiento establecido en el capítulo 5.

Zona de Intervención:

Para zonas con edificios:

La tabla 5.6 establece el umbral que proporciona la distancia de planificación, que es el de sobrepresión.

- A partir del umbral de sobrepresión (6000 Pa):

Según el procedimiento descrito en el capítulo 5 y utilizando la figura I.2, a la sobrepresión de 6000 Pa le corresponde la distancia escalada de 20. La distancia que define la Zona de Intervención con edificios a partir del umbral de sobrepresión ($r_{ZI(P)edf}$) es (ec. 5.14):

$$r_{ZI(P)edf} = 20 W_{TNT}^{1/3} = 710 \text{ m} \quad (\text{II.5})$$

En exteriores sin edificaciones (22500 Pa):

En la figura I.2, para la sobrepresión de 22500 Pa se obtiene una distancia escalada de 7. La distancia que define la Zona de Intervención para seres humanos en el exterior ($r_{ZI \text{ sin edf}}$) es (ec. 5.17):

$$r_{ZI \text{ sin edf}} = 7 W_{TNT}^{1/3} = 7 \cdot 45000^{1/3} = 250 \text{ m} \quad (\text{II.6})$$

Zona de Alerta:

La tabla 5.6 establece que el umbral que proporciona la menor distancia de planificación es el de sobrepresión.

- A partir del umbral de sobrepresión (1300 Pa):

Según el procedimiento descrito en el capítulo 5, a la sobrepresión de 1300 Pa le corresponde en la figura I.2 una distancia escalada de 70. La distancia que define la Zona de Alerta a partir del umbral de sobrepresión ($r_{ZA(P)}$) es (ec. 5.18):

$$r_{ZA(P)} = 70 W_{TNT}^{1/3} = 70 \cdot 45000^{1/3} = 2490 \text{ m} \quad (\text{II.7})$$

En resumen:

Distancia de Intervención sin edificios: 250 m.

Distancia de Intervención con edificios: 710 m.

Distancia de Alerta: 2490 m.

II.2. EJEMPLO PARA NUBES DE VAPOR

II.2.1. Aplicación del método Multienergía con la metodología GAME de selección del nivel de explosión

II.2.1.1. Descripción del escenario

En la planta de almacenamiento de gases licuados del petróleo (GLP) representada en la figura II.1 se produce una fuga de propano por rotura de la tubería que conecta a la esfera E 2001. El diámetro de esta tubería es de 6 pulgadas y se supone su rotura total por impacto. Se estima que se produce la ignición a los 10 minutos de iniciarse la fuga.

II.2.1.2. Datos básicos del propano

Entalpía de combustión (ΔH_c): $4.6 \cdot 10^7$ J/kg

Límite inferior de inflamabilidad (LII): 38500 mg/m^3

Masa molecular (μ): 44 kmol/kg

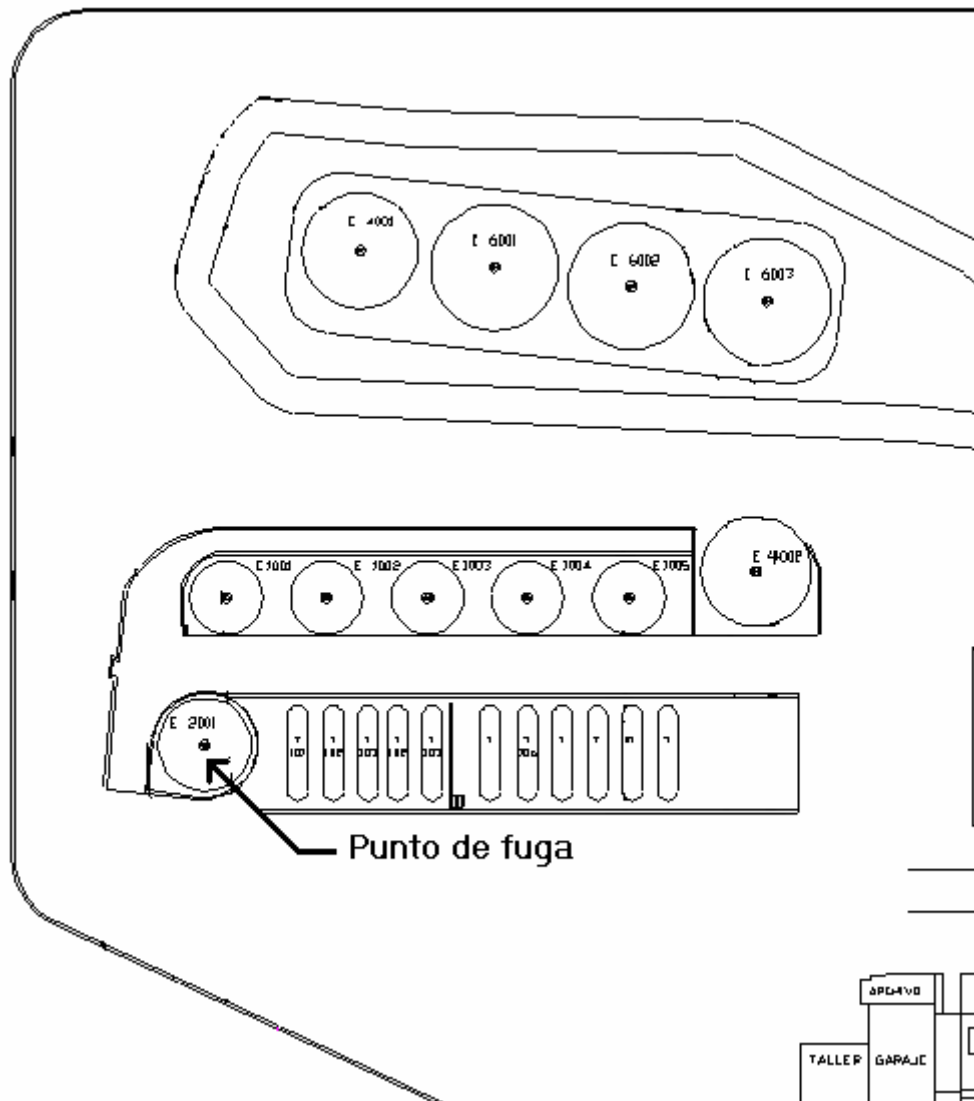


FIGURA II.1. Planta de almacenamiento de GLP

II.2.1.3. Aplicación del procedimiento

Etapa 1. Determinación de la masa, ubicación y volumen de la nube explosiva.

Se aplica un modelo de fuga y dispersión para determinar la masa de nube explosiva. La masa del combustible situado en la parte de la nube de concentración superior a la del límite inferior de inflamabilidad (LII) es de 3000 kg. Se muestra la ubicación de la nube en la figura II.2.

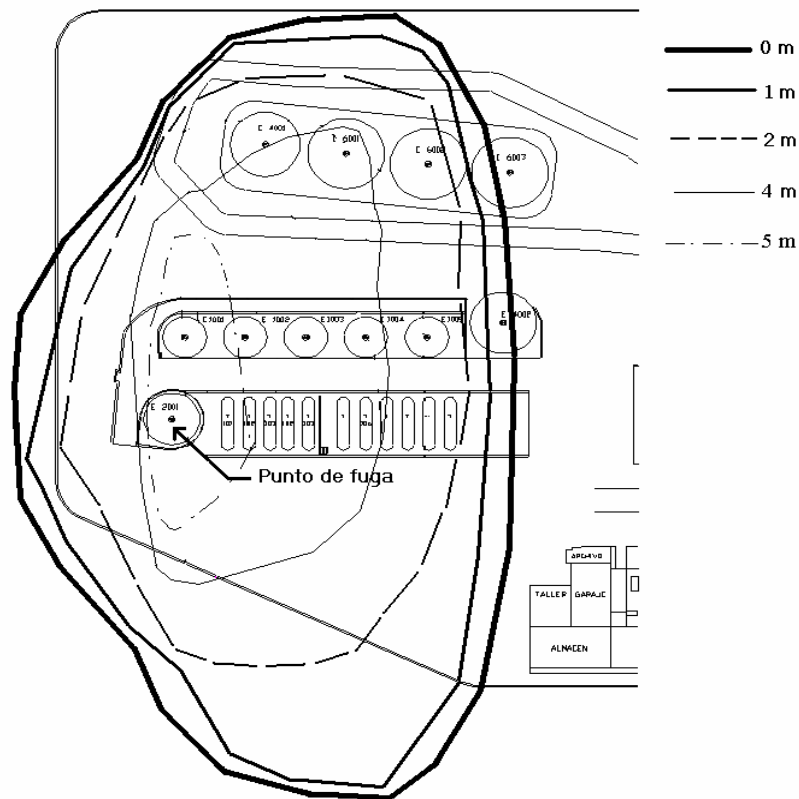


FIGURA II.2. Isopletas correspondientes al LII de la nube de propano a diferentes alturas

El punto más alto de concentración correspondiente al LII está situado a unos 5.8 m sobre el suelo. Para determinar el volumen de las cajas es necesario calcular la altura media de la nube en la zona obstruida. Para ello en la figura II.3 se modeliza la nube como un casquete semiesférico de radio r_{casq} y su volumen se iguala al de un cilindro vertical (de radio R_{cil}) cuya base tenga la misma área que la de la zona obstruida sumergida en la nube. La altura de dicho cilindro es la altura media de la nube.

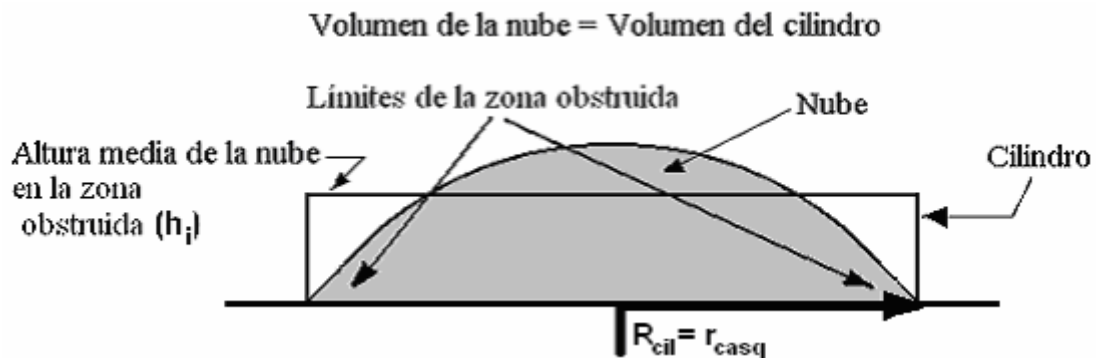


FIGURA II.3. Modelización de la parte obstruida de la nube como un casquete semiesférico de volumen igual al de un cilindro

El volumen del casquete esférico ($V_{casquete}$, m^3) viene dado por la expresión:

$$V_{casquete} = \pi R_{esf} c^2_{casq} - \left(\frac{\pi c^3_{casq}}{3} \right) \quad (II.8)$$

donde R_{esf} (m) es el radio de la esfera del casquete y c_{casq} (m) es la altura del casquete.

El volumen de un cilindro ($V_{cilindro}$, m^3) se calcula mediante la expresión:

$$V_{cilindro} = \pi R^2_{cil} h_i \quad (II.9)$$

donde R_{cil} (m) es el radio del cilindro y h_i (m) la altura del mismo (que es la altura media de la nube).

Al ser iguales las bases, el radio del cilindro es igual al del casquete.

En la figura II.4. se muestran las variables características de un casquete esférico, donde R_{esf} y r_{casq} (m) son los radios de la esfera y del casquete, respectivamente, c_{casq} (m) la altura del mismo y l_1 y l_2 (m) son parámetros utilizados en el cálculo.

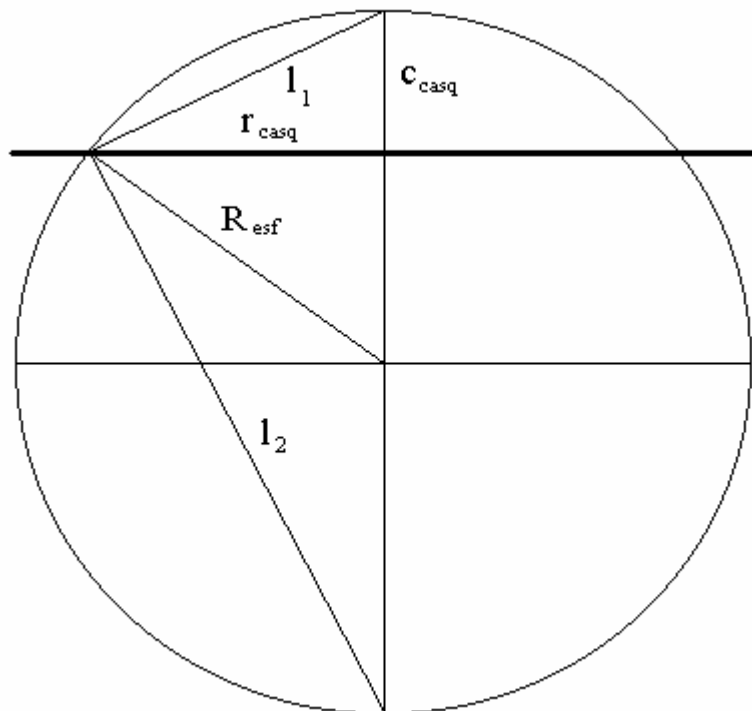


FIGURA II.4. Variables para el cálculo de la altura media del casquete a partir de una esfera de radio R_{esf}

De la figura II.4 se deducen las siguientes relaciones geométricas:

$$l_1^2 = r_{casq}^2 + c_{casq}^2 \quad \text{(II.10)}$$

$$l_2^2 = r_{casq}^2 + (2R_{esf} - c_{casq})^2 \quad \text{(II.11)}$$

$$(2R_{esf})^2 = l_1^2 + l_2^2 \quad \text{(II.12)}$$

De las ecuaciones anteriores se obtiene:

$$R_{esf} = \frac{r_{casq}^2 + c_{casq}^2}{2c_{casq}} \quad \text{(II.13)}$$

Sustituyendo esta expresión en la ecuación II.8 se obtiene:

$$V_{casquete} = \pi \cdot c_{casq} \cdot \left(\frac{r_{casq}^2}{2} + \frac{c_{casq}^2}{6} \right) \quad \text{(II.14)}$$

Igualando el volumen del casquete al del cilindro y suponiendo que ambos tienen la misma base, puede obtenerse la altura media de la nube (h_i , m):

$$h_i = \frac{1}{2} c_{casq} \left(1 + \frac{c_{casq}^2}{3r_{casq}^2} \right) \quad \text{(II.15)}$$

En la mayoría de los casos, al ser el cociente $c_{casq}^2 / 3r_{casq}^2$ pequeño, la altura media de la nube se aproxima a la mitad de la altura del casquete esférico. Como se comentó anteriormente, el casquete es el delimitado por las alturas máxima (h_{max} , m) y mínima (h_{min} , m) de las isopletas del LII que pasan por la zona obstruida. Para obtener la altura media de la nube sobre el suelo se debe calcular la semisuma de las alturas de dichas isopletas. En la figura II.5 se representa la situación expuesta para un caso hipotético.

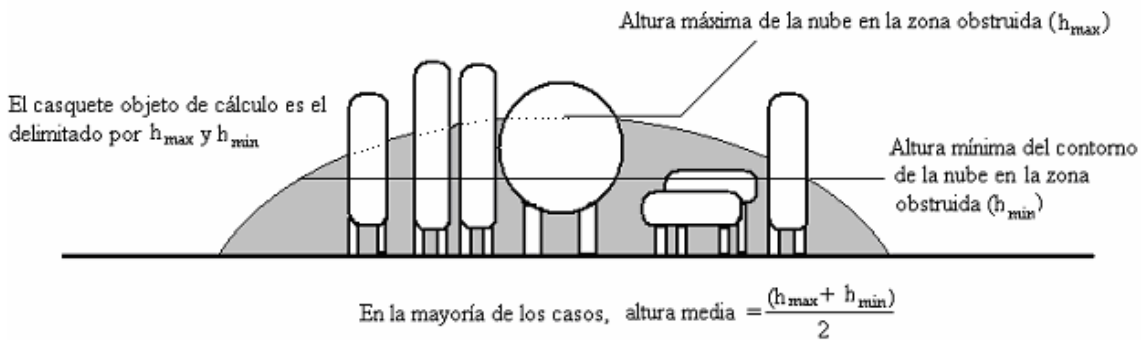


FIGURA II.5. Cálculo generalizado de la altura media de la nube en la zona obstruida

Para el ejemplo considerado, se toma la altura h_{min} a nivel de suelo -0 m-, puesto que el LII pasa por los límites de la zona obstruida. Como la altura máxima de la nube es de 5.8 m, la altura media es de unos 3 m, medidos a partir del suelo. El radio del casquete es de 45 m.

Cálculo del volumen de la nube explosiva:

El volumen de la nube explosiva es:

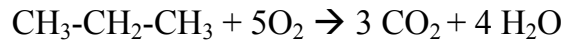
$$V_c = \frac{m_{exp}}{\rho X_s} \quad (\text{II.16})$$

La densidad se calcula teniendo en cuenta las condiciones ambientales y considerando al gas como ideal.

$$\rho = \frac{\mu P_0}{R T} = 1.86 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{II.17})$$

Donde μ es la masa molecular del propano, P_0 la presión atmosférica, R la constante universal de los gases (0.082 atm·l/(mol·K)), y T la temperatura ambiente (288 K).

La reacción de combustión es:



Por lo tanto, la fracción molar estequiométrica (X_s) del propano en el aire es:

$$X_s = \frac{n_{\text{propano}}}{n_{\text{propano}} + n_{\text{oxígeno}} + n_{\text{nitrógeno}}} = \frac{1}{1 + 5 + 20} = 0.04 \quad (\text{II.18})$$

(El número de moles de nitrógeno -20- se obtiene al considerar que en aire $n_{\text{N}_2}/n_{\text{O}_2} \approx 4$, siendo $n_{\text{O}_2} = 5$).

Para una masa explosiva (m_{exp}) de 3000 kg, el volumen de la nube explosiva (V_c) es:

$$V_c = \frac{m_{exp}}{\rho X_s} = 40300 \text{ m}^3 \quad (\text{II.19})$$

Donde ρ y X_s se han calculado anteriormente.

Etapa 2. Definición de las regiones obstruidas, determinación de su volumen y de la energía de la explosión.

En la figura II.6 se establecen las diferentes regiones obstruidas y las 7 “cajas” que encierran a las mismas con sus correspondientes dimensiones¹. Las alturas de las cajas quedan limitadas por la de la nube, que es 3 m.

Para conocer el volumen de nube obstruida en cada caja ($V_{nube\ i}^*$) es necesario estimar el volumen de los objetos inmersos en el interior ($V_{obj\ i}^{ob}$) de la nube, que serán casquetes de esfera en las cajas 1, 2, 3, 4 y 7 y de cilindro en las cajas 5 y 6 (ya que la nube no cubre totalmente los depósitos).

¹ Aunque las cajas 1 y 7 tienen partes que superan el contorno de la nube, se tomará en consideración todo el volumen de la caja, adoptándose así un criterio conservador.

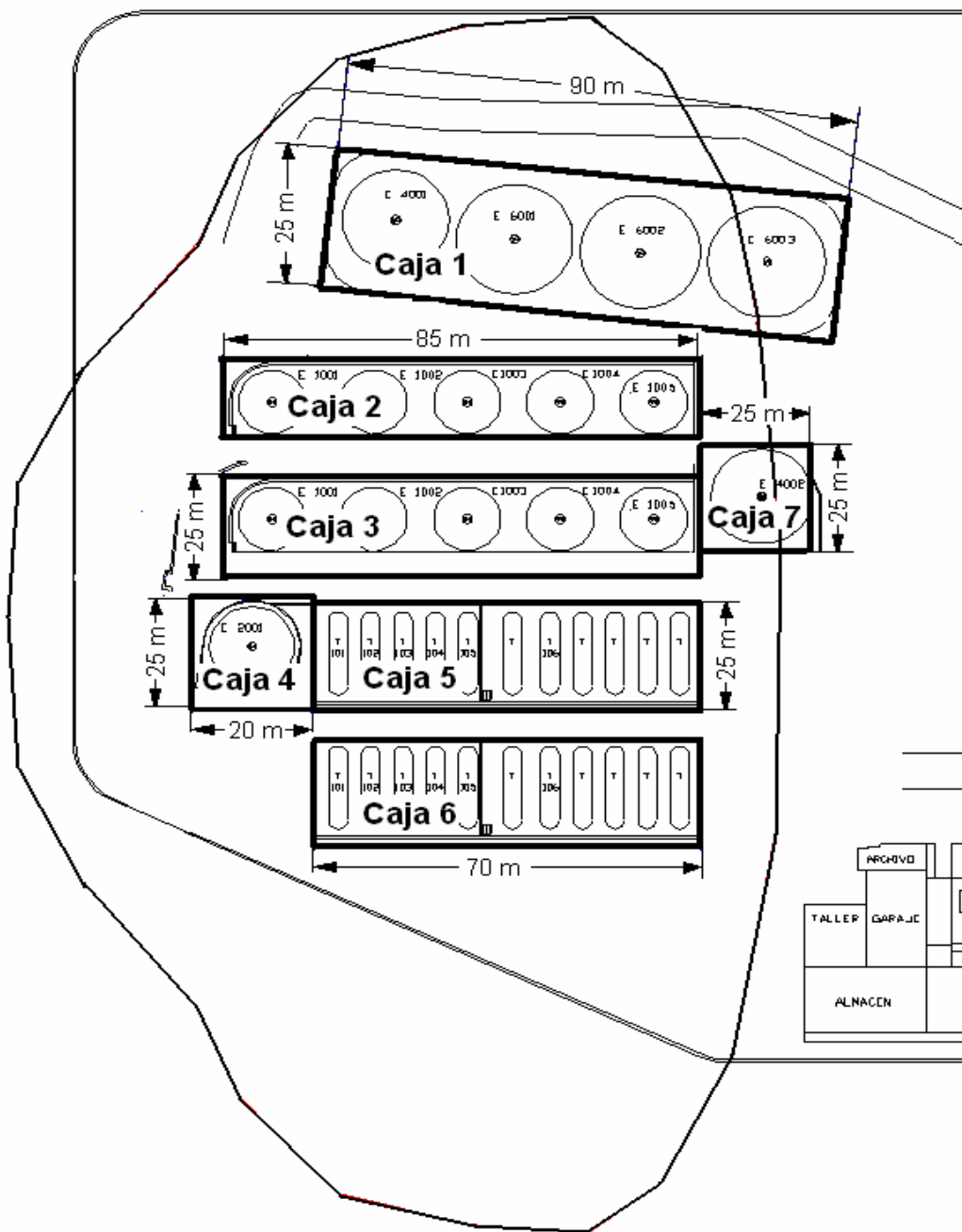


FIGURA II.6. Cajas seleccionadas para el cálculo de la nube obstruida. Se indican sus dimensiones en metros.

En la tabla II.1 se resume el cálculo del volumen de la parte de nube obstruida en cada caja, $V_{nube\ i}^*$. A continuación, se detalla el cálculo de V_{nube2}^* como ejemplo pormenorizado de aplicación del procedimiento:

En primer lugar se determina el volumen total de la caja 2, $V_{caja\ 2}$, de dimensiones $85 \times 25 \times 3$:

$$V_{caja\ 2} \approx 6400\ m^3$$

Al volumen así obtenido se le sustrae el ocupado por los cinco casquetes de las esferas² de 18 m de diámetro con altura de 1.5 m, que es la que corresponde a la parte de la esfera que se encuentra sumergida en la nube (ver figura II.7).

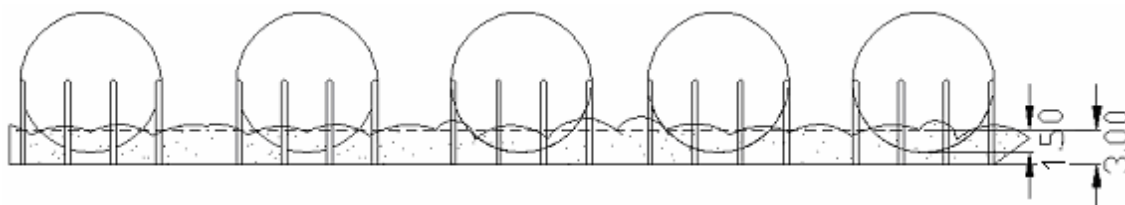


FIGURA II.7. Esferas de las cajas 2 y 3, elevadas 1.50 m sobre el suelo e inmersas en la nube de 3 metros de altura

TABLA II.1. Resumen del cálculo del volumen total de la nube obstruida

Caja	Dimensiones de la esfera o cilindro (diámetro - D_i - y longitud - L_i -)		Dimensiones de la caja			Elevación depósito ³ (m)	Volumen caja (m^3) $V_{caja\ i}$	Volumen ocupado por objetos (m^3) $V^{obj\ i}$	Volumen de nube en la caja (m^3) $V_{nube\ i}^*$
	D_i (m)	L_i (m)	a_i (m)	b_i (m)	c_i (m)				
1	23	-	90	25	3	1.5	6800	300	6500
2	18	-	85	25	3	1.5	6400	300	6100
3	18	-	85	25	3	1.5	6400	300	6100
4	20	-	25	20	3	1.5	1500	70	1400
5	3	20	70	25	3	1.5	5300	860	4440
6	3	20	70	25	3	1.5	5300	860	4440
7	20	-	25	25	3	1.5	1900	70	1800
Total								≈ 31000	

³ Se refiere a la elevación mínima del depósito correspondiente (esfera o cilindro) sobre el suelo

$$V_{gr} \approx 31000\ m^3$$

² En este caso se ha calculado el volumen exacto del casquete de esfera sumergida en la nube. Sin embargo, por la propia incertidumbre asociada al método y por las suposiciones conservadoras que se han adoptado, son aplicables estimaciones del volumen que simplifiquen el cálculo.

En la práctica pueden presentarse muchas situaciones en las que el volumen de los objetos inmersos en la nube sea despreciable con respecto al volumen total de ésta en la caja. De este modo se agiliza el proceso de cálculo, sin que el error introducido sea grande comparado con la incertidumbre global del método. La decisión de simplificar los cálculos queda a criterio de los usuarios que aborden el cálculo de las Zonas de Planificación.

El volumen de la parte no obstruida de la nube, V_o , es:

$$V_o = V_c - V_{gr} = 9300 \text{ m}^3 \quad (\text{II.20})$$

Siendo V_c y V_{gr} los volúmenes de la nube total y de la nube en zona obstruida, respectivamente.

A continuación se calcula la energía liberada en la combustión de la nube.

-Para la nube obstruida:

$$E_{gr} = V_{gr} \rho X_s \Delta H_c = 1.1 \cdot 10^{11} \text{ J} \quad (\text{II.21})$$

-Para la nube libre:

$$E_o = V_o \rho X_s \Delta H_c = 3.2 \cdot 10^{10} \text{ J} \quad (\text{II.22})$$

Etapas 3. Situación de los centros de la parte obstruida y de la parte libre de la nube y cálculo de sus radios.

El criterio general es que ambos centros se pueden considerar en el mismo punto si los obstáculos están uniformemente distribuidos. En este caso, se consideran dos centros diferentes, puesto que la zona obstruida está desplazada con respecto a la no obstruida (figura II.8). Las situaciones de los centros no influyen en la metodología de cálculo, pero deben tenerse en cuenta como orígenes a partir de los cuales se consideran las distancias.

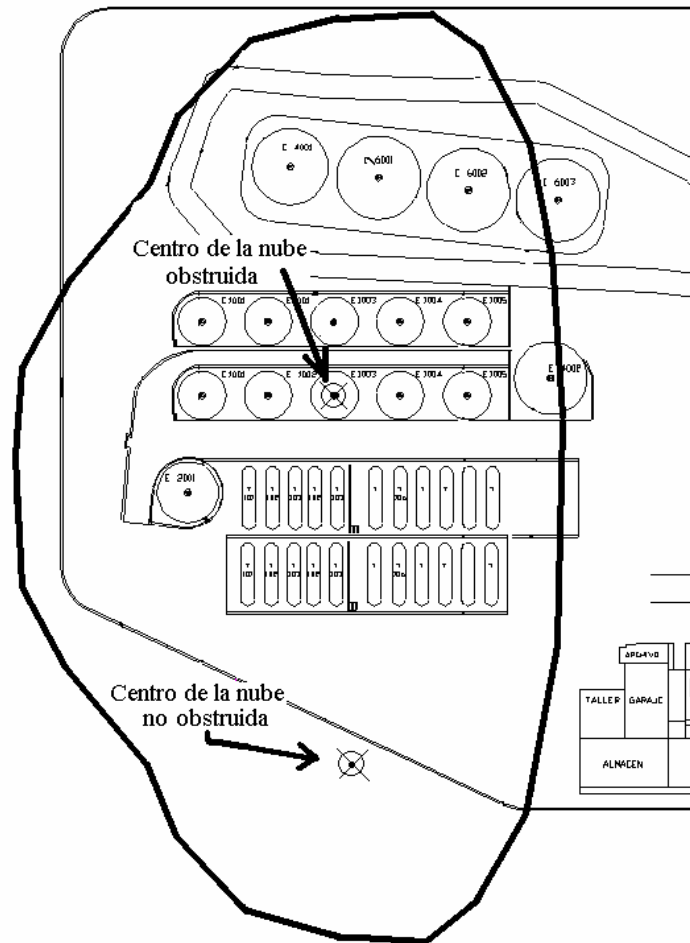


FIGURA II.8. Centros de la explosión, situados en los centros geométricos aproximados de la nube obstruida y de la nube libre.

Las ecuaciones II.23 y II.24 permiten calcular los radios de las nubes obstruida y libre consideradas semiesféricas.

$$R_o^{gr} = \sqrt[3]{\frac{3 V_{gr}}{2 \pi}} \approx 25 \text{ m} \quad \text{(II.23)}$$

$$R_o^o = \sqrt[3]{\frac{3 V_o}{2 \pi}} \approx 16 \text{ m} \quad \text{(II.24)}$$

Tal como se indica en el anexo I, se deben calcular los efectos tanto de la nube obstruida como de la libre, y tomar la que produzca las peores consecuencias. No obstante, puesto que en este caso la parte obstruida es mayor que la parte libre de la nube, los cálculos se realizan sólo para la primera, ya que la sobrepresión e impulso generados por la parte libre de la nube son comparativamente despreciables frente a los de aquella.

Etapa 4. Selección del nivel de la explosión adecuado.

La siguiente etapa es seleccionar el nivel de la explosión a utilizar, siguiendo para ello el procedimiento recomendado por las guías GAME y GAMES, que es el más preciso.

Deben calcularse los parámetros siguientes: *relación de volumen bloqueado (VBR)*, *diámetro promedio hidráulico (D_{hym})*, *longitud del camino recorrido por la llama (L_p)* y *velocidad de combustión laminar (S_L)* para aplicar la correlación correspondiente a una expansión en tres dimensiones, puesto que en este caso no existen planos de confinamiento.

El parámetro L_p coincide con el radio de la nube semiesférica (ecuación II.23), que en este caso es 25 m. En cuanto a S_L , se considera el indicado en la tabla I.8, que para el propano es 0.52 m/s.

La *relación de volumen bloqueado, VBR*, es (ec. I.15):

$$VBR = \frac{V_{obs}}{V_{con,min}} = 0.08 \quad (\text{II.25})$$

donde V_{obs} es el volumen total de objetos en todas las cajas (2800 m³) y $V_{con,min}$ es el volumen de la mínima caja que contenga a la zona obstruida, que en este caso se toma igual a la suma de los volúmenes de todas las cajas (34000 m³) -ver tabla II.1-

Para calcular D_{hym} (ec. I.18), es necesario determinar la superficie de los depósitos sumergida en la nube, que para las esferas es el casquete de 1.5 m de altura (diferencia entre la altura de la nube -3 m- y la elevación del recipiente -1.5 m-) y para los cilindros es el 50% de su área superficial, puesto está sumergida en la nube la mitad de cada depósito. Se utilizan las ecuaciones siguientes:

Área superficial del casquete esférico en contacto con la nube:

$$A_{casquete} = 2 \pi R_{esf} c_{casq} \quad (\text{II.26})$$

Área superficial de los depósitos cilíndricos:

$$A_{cilindro} = 2 \pi R_{cil} (R_{cil} + L_i) \quad (\text{II.27})$$

siendo c_{casq} la altura del casquete esférico sumergido en la nube (1.5 m), L_i la longitud del cilindro (m), y R_{esf} ó R_{cil} los radios (m) de la esfera o cilindro de que se trate, respectivamente. Se obtiene un área total de los objetos sumergidos en la nube (ΣA_i) de 6000 m².

Así:

$$D_{hym} = 4 \cdot \frac{V_{obs}}{\sum A_i} = 1.9 \text{ m} \quad (\text{II.28})$$

Una vez determinados los parámetros anteriores, la ecuación I.19, correspondiente a una expansión en 3D, permite calcular la presión inicial de la explosión (P_i , bar):

$$P_i = 0.84 (VBR \frac{L_p}{D_{hym}})^{2.75} S_L^{2.7} D_{hym}^{0.7} \approx 0.25 \text{ bar} \quad (\text{II.29})$$

que corresponde a una sobrepresión escalada P' de 0.25. En la figura I.5, para la distancia escalada R'_0 y la sobrepresión escalada 0.25 se obtiene un nivel de aproximadamente 5.

Para el cálculo de las Zonas de Planificación se continúa en el apartado II.2.2; no obstante, se incluye a continuación (etapa 5) el cálculo a modo de ejemplo de los parámetros característicos de la onda de presión a una distancia determinada.

Etapa 5. Determinación de los parámetros característicos de la explosión.

A continuación se determinan las magnitudes peligrosas de la explosión a 100 m de distancia al centro de la misma. La distancia escalada, R' (ec. I.3), es la siguiente:

$$R' = \frac{z}{\sqrt[3]{\frac{E_{exp}}{P_0}}} \approx 1 \quad (\text{II.30})$$

A partir de las figuras I.5 a I.7 en el nivel 5, para $R' = 1$ se obtiene: $P' \approx 0.12$, $Q' \approx 0.014$ y $t'_p \approx 0.7$ que corresponden a: $P_s = 12000 \text{ Pa}$, $Q = 1.4 \cdot 10^3 \text{ Pa}$ y $t_p = 0.21 \text{ s}$. Utilizando la ecuación 2.2 se determina el impulso mecánico de la onda:

$$i = \frac{1}{2} P_s t_p = 1300 \text{ Pa}\cdot\text{s} \quad (\text{II.31})$$

Dada la complejidad y extensión del procedimiento es aconsejable utilizar modelos informatizados especialmente diseñados para esta finalidad. Los

modelos existentes no incluyen la metodología de selección del nivel de la explosión. Dado que los resultados pueden variar considerablemente dependiendo del nivel seleccionado, se ha desarrollado un modelo informático (ZEUS, Zonas de Planificación para Explosiones indUSTriales) -Díaz Alonso et al. (2006)- que incluye los métodos utilizados en esta monografía para el cálculo de las magnitudes peligrosas (sobrepresión, impulso y alcance de los fragmentos), el análisis de consecuencias (sobre humanos y edificios), así como el establecimiento de las Zonas de Planificación.

II.2.2. Cálculo de las Zonas de Planificación

En primer lugar se selecciona el umbral que define cada Zona de Planificación a partir de la tabla 5.6.

Zona de Intervención:

Con edificios:

La tabla 5.6 establece el umbral adecuado para determinar la distancia de planificación, que es el de sobrepresión (6000 Pa):

Según el procedimiento descrito en el capítulo 5, para el nivel 5 de la figura 3.5 y $P' = 0.06$ se obtiene $R' = 2$. La distancia de Intervención en este caso -ec. 5.24- ($r_{ZI(P)edf}$) es:

$$r_{ZI(P)edf} = 2 \left(\frac{E_{\text{exp}}}{P_0} \right)^{1/3} = 210 \text{ m} \quad (\text{II.32})$$

Sin edificios (22500 Pa):

Con relación a la figura I.5, se observa que la sobrepresión escalada 0.225 supera el valor máximo del nivel 5 (que es 0.2), por ello, el valor considerado es este último. Esta sobrepresión se mantiene hasta $R' = 0.5$, aproximadamente, que es el utilizado para determinar la Zona de Intervención. La distancia de Intervención sin edificios es -ec. 5.27-:

$$r_{ZI \text{ sin edf}} = 0.5 \left(\frac{E_{\text{exp}}}{P_0} \right)^{1/3} = 50 \text{ m} \quad (\text{II.33})$$

En este caso los daños a los seres humanos en exteriores se producen a distancias próximas al centro de la explosión.

Zona de Alerta:

La tabla 5.6 establece el umbral para determinar la distancia de planificación, que es el de sobrepresión (1300 Pa):

Según el procedimiento descrito en el capítulo 5, para el nivel 5 de la figura I.5 y $P' = 0.013$ se obtiene $R' = 10$. La distancia de Alerta en este caso -ec. 5.27- ($r_{ZA(P)}$) es:

$$r_{ZA(P)} = 10 \left(\frac{E_{\text{exp}}}{P_0} \right)^{1/3} = 1000 \text{ m} \quad \text{(II.34)}$$

En resumen:

Distancia de Intervención sin edificios: 50 m.

Distancia de Intervención con edificios: 210 m.

Distancia de Alerta: 1000 m.

II.3. EJEMPLO PARA RECIPIENTES A PRESIÓN CON GAS IDEAL

II.3.1. Descripción del escenario

Estallido de un depósito cilíndrico horizontal de 115 m³ con nitrógeno a 30 bar. El depósito tiene un diámetro de 3 m, una longitud aproximada de 15 m y una masa de 15 Tm. Por fallo estructural del material, se produce la rotura del depósito generándose una onda de presión y fragmentos.

II.3.2. Aplicación del procedimiento

Etapa 1. Condiciones y datos de partida.

TABLA II.2. Datos de partida para la aplicación del método de Baker con gas ideal

Sustancia	Nitrógeno gas
Tipo de estallido	Explosión de recipiente con gas a presión.
p₁: Presión interior (absoluta)	31·10 ⁵ Pa
V_g: Volumen del recipiente	115 m ³
γ₁ = C_p/C_v	1.4
Forma del recipiente	Cilíndrico

Al tratarse de nitrógeno gas, puede considerarse que se comporta como un gas ideal, por lo que se inicia el procedimiento en la etapa 2 del método de Baker (apartado I.4.1).

Etapa 2. Determinación de la energía liberada.

Energía liberada en la expansión de un gas ideal (E_{av} , J) -ec. I.34-:

$$E_{av} = \frac{(p_1 - P_0) V_g}{\gamma_1 - 1} = 8.63 \cdot 10^8 \text{ J} \quad \text{(II.35)}$$

Etapa 3. Determinación de la energía efectiva de la onda de presión, E_{exp} (J).

Como el recipiente no se encuentra elevado, $A_{sb} = 2$ (ver etapa 3 del apartado I.4.1).

$$E_{exp} = A_{sb} E_{av} = 1.73 \cdot 10^9 \text{ J} \quad (\text{II.36})$$

Para calcular las Zonas de Planificación debe continuarse en el apartado II.3.4. No obstante, si se desea seguir la secuencia de aplicación directa del método de Baker, se propone el cálculo de los parámetros característicos de la onda de presión a dos distancias (100 m y 25 m).

Etapa 4A. Determinación de la sobrepresión y del impulso a determinadas distancias del origen del recipiente afectado.

Mediante la ecuación I.3 se obtienen los respectivos valores de R' :

$$z_1 = 100 \text{ m} \quad R' = z \left[\frac{P_0}{E_{exp}} \right]^{1/3} = 3.9 \quad (\text{II.37})$$

$$z_2 = 25 \text{ m} \quad R' = z \left[\frac{P_0}{E_{exp}} \right]^{1/3} = 0.97 \approx 1 \quad (\text{II.38})$$

Comprobación del valor de R'

De acuerdo con lo expuesto en el apartado I.4.1, se debe continuar en etapas diferentes dependiendo del valor de R' . En este caso, para $z_1 = 100 \text{ m}$ ($R' > 2$), se debe continuar en la determinación de la sobrepresión con la figura I.13, mientras que para $z_2 = 25 \text{ m}$ ($R' < 2$), se debe continuar en el apartado I.4.1.1.

Determinación de la sobrepresión estática adimensional de la onda de presión (P') para todos los tipos de estallidos, excepto para el caso de recipientes con gas ideal en las proximidades de la explosión ($R' < 2$) -apartado I.4.1.1 del anexo I-.

A partir de la figura I.13, para $R'=3.9$ (correspondiente a $z_1 = 100$ m) se obtiene una sobrepresión escalada, P'_1 , de $5 \cdot 10^{-2}$.

Método de Baker refinado. Determinación de la sobrepresión estática adimensional (P') para el estallido de un recipiente a presión con un gas ideal y $R' < 2$.

Para determinar la sobrepresión escalada se siguen las etapas 1.1 a 1.5 del apartado I.4.1.1.

Etapla 1.1. Relación de las velocidades del sonido en el gas comprimido y en el aire ambiente (c_1/c_0).

La relación se calcula mediante la ecuación I.41:

$$\left(\frac{c_1}{c_0}\right)^2 = \frac{\gamma_1 T_g \mu_a}{\gamma_a T_a \mu_1} \approx 1 \quad (\text{II.39})$$

donde la temperatura ambiente (T_a) es la del gas (T_g), los valores de γ del gas y del aire son iguales -1.4-, y las masas moleculares del aire (μ_a) y del gas (μ_1) son 29 y 28 kg/kmol, respectivamente, por lo que la relación de velocidades c_1/c_0 es próxima a la unidad.

Etapla 1.2. Cálculo de la distancia inicial

Como se indica en el apartado I.4.1.1, se denomina distancia inicial al radio de la semiesfera de volumen igual al del recipiente en cuestión, así para 115 m³ se verifica -ec. I.42-:

$$z_o = 0.782 V_g^{1/3} = 3.8 \text{ m} \quad (\text{II.40})$$

Con esta distancia se calcula el valor de R'_o (ec. I.43):

$$R'_o = z_o \left(\frac{P_o}{E_{\text{exp}}}\right)^{1/3} = 0.147 \quad (\text{II.41})$$

Etapa 1.3. Cálculo de la sobrepresión inicial P'_{s0}

La sobrepresión inicial adimensional (P'_{s0}), se obtiene en la figura I.15, haciendo uso de los parámetros siguientes:

$$\left(\frac{c_1}{c_0}\right)^2 = 1 \quad \text{y} \quad \frac{p_1}{P_o} = 31$$

obteniéndose $P'_{s0} = 3.5$

Etapas 1.4 y 1.5. Selección del nivel de la explosión adecuado en la figura I.17 y determinación del valor de P'

Con los valores de R'_0 y P'_{s0} antes calculados se selecciona el nivel de la explosión adecuado en la figura I.17, obteniéndose un valor P'_2 de $4.5 \cdot 10^{-1}$.

Determinación del impulso escalado, i' (apartado I.4.1):

A partir de este punto se utiliza el procedimiento general de Baker descrito en el apartado I.4.1 para cualquier distancia al origen de la explosión.

Utilizando la figura I.18, se obtiene:

$$\begin{array}{ll} \text{Para } R'_1 = 3.9: & i'_1 = 1.2 \cdot 10^{-2} \\ \text{Para } R'_2 = 1: & i'_2 = 5 \cdot 10^{-2} \end{array}$$

Etapa 11. Ajuste de la sobrepresión escalada, P' , y del impulso escalado, i' , por efectos geométricos.

En las tablas I.10 y I.11 se incluyen los factores de corrección de la sobrepresión escalada que para R'_1 son 1.4 (por tratarse de un recipiente cilíndrico) y 1.1 (por estar situado cerca del suelo), mientras que para el impulso escalado los factores correctores son la unidad. Por lo tanto:

$$\text{Para } R'_1: \quad P'_1 = (1.4)(1.1)(5 \cdot 10^{-2}) = 0.077 \quad \text{(II.42)}$$

$$i'_1 = 0.012 \quad \text{(II.43)}$$

De la misma forma, los factores de corrección de la sobrepresión escalada para R'_2 son 1.6 (por tratarse de un recipiente cilíndrico) y 2 (por estar situado cerca del suelo), mientras que para el impulso escalado son 1.1 (tabla I.10) y 1.6 (tabla I.11). Por lo tanto:

$$\text{Para } R'_2: \quad P'_2 = (1.6)(2)(4.5 \cdot 10^{-1}) = 1.44 \quad \text{(II.44)}$$

$$i'_2 = (1.1)(1.6)(5 \cdot 10^{-2}) = 0.088 \quad \text{(II.45)}$$

Cálculo de la sobrepresión estática, P_s (ec. I.31), y del impulso, i (ec. I.45):

Para $z_1 = 100$ m:

$$P_s = P' P_0 = 7700 \text{ Pa} \quad \text{(II.46)}$$

$$i = \frac{i' P_0^{2/3} E_{\text{exp}}^{1/3}}{c_0} = 91 \text{ Pa}\cdot\text{s} \quad \text{(II.47)}$$

Para $z_2 = 25$ m:

$$P_s = P' P_0 = 146000 \text{ Pa} \quad \text{(II.48)}$$

$$i = \frac{i' P_0^{2/3} E_{\text{exp}}^{1/3}}{c_0} = 670 \text{ Pa}\cdot\text{s} \quad \text{(II.49)}$$

Comprobación del valor de la sobrepresión estática, P_s :

Los valores calculados de P_s no superan la presión absoluta del recipiente antes del estallido, por lo que se acepta el resultado (ver apartado I.4.1).

II.3.3. Cálculo de la distancia alcanzada por los fragmentos

Etapa 1. Estimación del número y de la masa de los fragmentos

Se trata de un cilindro que estalla por debilidad estructural, por lo que se estima que se forman 2 fragmentos desiguales, -ver tabla I.12-. Tal y como se comenta en el apartado I.4.2, el fragmento tipo cohete no se considera para el cálculo del alcance máximo, por lo que sólo se considera el extremo semiesférico (tapa). Para determinar la masa del fragmento se calcula la densidad superficial -90 kg/m²-, teniendo en cuenta que la masa del recipiente es de 15 Tm y su superficie total de, aproximadamente, 170 m². Así, la masa del fragmento semiesférico es -ver tabla I.13-:

$$M_f = 2\pi \left(\frac{d_v}{2} \right)^2 90 = 1300 \text{ kg} \quad (\text{II.50})$$

Puesto que se trata del estallido de un recipiente con gas ideal, se debe continuar en la etapa 2a.

Etapa 2a. Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos con el método de Baker y Gelfand (para explosiones internas, reacciones fuera de control y recipientes con gas ideal).

En primer lugar, se determina la velocidad del sonido en el gas comprimido en el momento inmediatamente anterior al estallido (c_1 , m/s) mediante la ecuación I.47:

$$c_1^2 = \frac{T_g \gamma_1 R}{\mu_1} = 134300 \text{ m}^2 / \text{s}^2 \quad (\text{II.51})$$

A continuación se calcula la sobrepresión escalada adimensional (P'_1) mediante la ecuación I.48:

$$P'_1 = \frac{(p_1 - P_0) V_g}{M_V c_1^2} = 0.17 \quad (\text{II.52})$$

donde p_1 es la presión absoluta en el interior del recipiente en el momento inmediatamente anterior al estallido ($31 \cdot 10^5$ Pa), P_0 es la presión atmosférica (101300 Pa), V_g el volumen de gas en el interior del recipiente (115 m³), M_V la

masa del recipiente (15000 kg) y c_1 es la velocidad del sonido en el gas comprimido en el momento inmediatamente anterior al estallido (366 m/s).

La relación entre la longitud ($L_V = 15$ m) y el diámetro ($d_V = 3$ m) es 5 y dado que se trata del estallido de un recipiente con gas ideal se utiliza la figura I.22, donde se obtiene, para un valor P'_1 de 0.17, una relación v_i/c_1 de 0.23, y con ella la velocidad inicial de los fragmentos originados en la explosión (v_i , m/s) es:

$$v_i = \left(\frac{v_i}{c_1} \right) c_1 = 84 \text{ m/s} \quad (\text{II.53})$$

Etapa 2c. Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos con el método de Moore.

La velocidad inicial de los fragmentos (v_i , m/s) se calcula mediante la ecuación I.52:

$$v_i = 1.092 \left(\frac{E_{av}}{M_V} \right)^{0.5} = 262 \text{ m/s} \quad (\text{II.54})$$

donde E_{av} es la energía liberada en la expansión ($8.63 \cdot 10^8$ J), calculada en la etapa 2 del método de Baker y M_V es la masa del recipiente (15000 kg).

Etapa 3a. Elección de la velocidad inicial adecuada.

La velocidad obtenida en la etapa 2a es menor que la de la etapa 2c, por lo que se toma la primera, según el criterio establecido en la metodología.

Etapa 4. Determinación del alcance de los fragmentos.

La velocidad inicial escalada (v'_i , adimensional) se obtiene mediante la ecuación I.53:

$$v'_i = \frac{\rho_0 C_D A_D v_i^2}{M_f g} = 2.9 \quad (\text{II.55})$$

siendo v_i la velocidad inicial seleccionada en la etapa anterior.

El factor de rozamiento ($C_D A_D$) depende del tamaño y forma del fragmento, así como de su posición durante el vuelo. En este caso, según la tabla I.15 es:

$$C_D A_D = 0.615 \frac{\pi}{4} d_V^2 = 4.3 \text{ m}^2 \quad (\text{II.56})$$

El valor de R'_f obtenido en la figura I.26 es 1.5, con el que se obtiene el alcance de los fragmentos (R_f , m) mediante la ecuación I.54:

$$R_f = R'_f \frac{M_f}{\rho_0 C_D A_D} = 720 \text{ m} \quad (\text{II.57})$$

II.3.4. Cálculo de las Zonas de Planificación

Siguiendo el esquema de la figura 5.9, se calcula en primer lugar la **Zona de Alerta**:

A partir de la tabla 5.6 se deduce que la zona está condicionada por el umbral de impulso (40 Pa·s) -ec. 5.38-:

$$i' = \frac{6.47}{E_{\text{exp}}^{1/3}} = 5.39 \cdot 10^{-3} \quad (\text{II.58})$$

a dicho impulso le corresponde un valor de R' de 9.5 (ver figura I.18). La distancia de Alerta a partir del umbral de impulso ($r_{ZA(i)}$) es -ec. 5.39-:

$$r_{ZA(i)} = 9.5 \left(\frac{E_{\text{exp}}}{10^5} \right)^{1/3} = 246 \text{ m} \quad (\text{II.59})$$

Dado que alcance máximo de los fragmentos es superior a esta distancia se elige el primero como distancia de Intervención y no se establece Zona de Alerta (caso R_{fI} -ver figuras 5.8 y 5.9-):

$$r_{ZI} = R_f = 720 \text{ m} \quad (\text{II.60})$$

En resumen:

Distancia de Intervención con o sin edificios: 720 m.

Distancia de Alerta: No se establece

II.4. EJEMPLO PARA RECIPIENTES A PRESIÓN CON GAS NO IDEAL

II.4.1. Descripción del escenario

Una caldera de tubos de agua tiene una presión de diseño de 18 bar. El calderín, de 2.7 m de diámetro, 7.5 metros de largo y 25 Tm de masa mantiene en todo momento un 50% de líquido en su interior. El aumento de presión producido por sobrecalentamiento interno anómalo conduce a la rotura violenta del calderín, generándose una onda de presión y fragmentos. Según la tabla I.9, al producirse el fallo como consecuencia de un sobrecalentamiento, la presión de rotura (p_1) es 2.5 veces la de diseño, esto es, 45 bar.

II.4.2. Aplicación del procedimiento

Etapa 1. Condiciones y datos de partida.

TABLA II.3. Datos de partida para el ejemplo de aplicación directa del método de Baker para un recipiente con gas no ideal

Contenido del recipiente	50% agua líquida-50% vapor de agua
Tipo de estallido	BLEVE
p_1: Presión interior absoluta	45 bar
V_g: Volumen del recipiente	53 m ³ .
Forma del recipiente	cilíndrico

Según lo expuesto en el apartado I.4.1, se debe continuar en el caso 2.2 de la etapa 2.

Etapa 2. Determinación de la energía liberada

Caso 2.2. Sistema no ideal (vapor o mezcla líquido-vapor)

Se determina la energía interna en el estado inicial, u_1 (J/kg), para cada una de las fases.

Para el líquido (ec. I.35):

$$u_{1\text{ liq}} = h_{1\text{ liq}} - p_1 \cdot v_{1\text{ liq}} = 1.12 \cdot 10^6 \text{ J/kg} \quad (\text{II.61})$$

donde la entalpía específica $h_{1(\text{liq})}$ es $1.12 \cdot 10^6$ J/kg, el volumen específico $v_{1(\text{liq})}$ es $0.00127 \text{ m}^3/\text{kg}$ y p_1 es $4.5 \cdot 10^6$ Pa.

Para el vapor (ec. I.35):

$$u_{1\text{ vap}} = h_{1\text{ vap}} - p_1 \cdot v_{1\text{ vap}} = 2.6 \cdot 10^6 \text{ J/kg} \quad (\text{II.62})$$

donde la entalpía específica $h_{1\text{ vap}} = 2.8 \cdot 10^6$ J/kg, el volumen específico $v_{1\text{ vap}}$ es $0.044 \text{ m}^3/\text{kg}$ y $p_1 = 4.5 \cdot 10^6$ Pa.

La energía interna del estado expandido se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$u_2 = (1-X) \cdot h_{2\text{ liq}} + X \cdot h_{2\text{ vap}} - (1-X) \cdot P_0 \cdot v_{2\text{ liq}} - X \cdot P_0 \cdot v_{2\text{ vap}} \quad (\text{I.37})$$

donde las entalpías específicas del líquido y del vapor ($h_{2\text{ liq}}$ y $h_{2\text{ vap}}$) son $4.17 \cdot 10^5$ y $2.675 \cdot 10^6$ J/kg, respectivamente, los volúmenes específicos del líquido y del vapor ($v_{2\text{ liq}}$ y $v_{2\text{ vap}}$) son $1.04 \cdot 10^{-3}$ y $1.69 \text{ m}^3/\text{kg}$, respectivamente, y la fracción de vapor de cada fase, X , se obtiene mediante las ecuaciones:

$$X_a = (s_{1\text{ liq}} - s_{2\text{ liq}}) / (s_{2\text{ vap}} - s_{2\text{ liq}}) \quad \text{Para el líquido (situación 2a de la fig. I.11)} \quad (\text{I.38a})$$

$$X_b = (s_{1\text{ vap}} - s_{2\text{ liq}}) / (s_{2\text{ vap}} - s_{2\text{ liq}}) \quad \text{Para el vapor (situación 2b de la fig. I.11)} \quad (\text{I.38b})$$

En el estado 2, las entropías específicas del líquido y del vapor saturados a presión atmosférica ($s_{2\text{ liq}}$ y $s_{2\text{ vap}}$) son 1.30 y $7.36 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$, respectivamente.

Aplicando las ecuaciones I.37 y I.38 a las fases líquida y vapor por separado, se verifica:

Para el líquido -ec. I.38a-:

$$X_a = (s_{1liq} - s_{2liq}) / (s_{2vap} - s_{2liq}) = 0.257 \quad (\text{II.63})$$

donde $s_{1liq} = 2.86 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$

Utilizando la ecuación I.37 se tiene, para la fase líquida (situación 2a de la figura I.11):

$$u_{2a} = 9.6 \cdot 10^5 \text{ J/kg}$$

Para el vapor -ec. I.38b-:

$$X_b = (s_{1vap} - s_{2liq}) / (s_{2vap} - s_{2liq}) = 0.78 \quad (\text{II.64})$$

donde $s_{1vap} = 6.02 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$

Aplicando la ecuación I.37 a la fase vapor (situación 2b de la figura I.11):

$$u_{2b} = 2.05 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$$

Se calculan a continuación las masas parciales de líquido y vapor en el calderín antes del estallido.

La masa de líquido en el calderín se obtiene a partir del volumen de recipiente ocupado por el mismo (50% de V_g (53 m^3)) y del volumen específico ($v_{1liq} = 0.00127 \text{ m}^3/\text{kg}$):

$$m_{1liq} = 0.5 V_g / v_{1liq} = 20900 \text{ kg} \quad (\text{II.65})$$

La masa de vapor en el calderín se obtiene de la misma forma que en el caso del líquido ($v_{1vap} = 0.0443 \text{ m}^3/\text{kg}$):

$$m_{1vap} = 0.5 V_g / v_{1vap} = 600 \text{ kg} \quad (\text{II.66})$$

La energía total liberada se obtiene aplicando la ecuación I.39:

$$E_{av} = (m_{1liq} u_{1liq} + m_{1vap} u_{1vap}) - (m_{1liq} u_{2a} + m_{1vap} u_{2b}) = 3.7 \cdot 10^9 \text{ J} \quad (\text{II.67})$$

Etapa 3. Determinación de la energía efectiva de la onda de presión, E_{exp} (J).

El calderín se encuentra elevado unos 7 m sobre el suelo. A partir de, aproximadamente, 26 m de distancia el ángulo de visión del calderín es menor que 15° . Como en el ejemplo propuesto los efectos se evalúan a una distancia de 200 m, se debe usar un factor A_{sb} de 2 (ver etapa 3 del apartado I.4.1). Así, la energía efectiva de la onda de presión es:

$$E_{exp} = A_{sb} E_{av} = 7.4 \cdot 10^9 \text{ J} \quad (\text{II.68})$$

Para determinar las Zonas de Planificación debe continuarse en el apartado II.4.4. No obstante, si se desea seguir la secuencia de aplicación directa del método de Baker, se propone el cálculo de los parámetros característicos de la onda de presión a una distancia de 200 m.

Etapa 4A. Determinación de la sobrepresión y del impulso a determinadas distancias del origen del recipiente afectado.

Cálculo de la distancia-energía escalada, R' (ec. I.3) a 200 m:

$$R' = z \left[\frac{P_0}{E_{exp}} \right]^{1/3} = 4.8 \quad (\text{II.69})$$

Determinación de la sobrepresión escalada:

Dado que R' es mayor que 2 y no se trata de un gas ideal, se utiliza la figura I.13, donde para $R' = 4.8$ se obtiene un valor de P' de $4 \cdot 10^{-2}$.

Determinación del impulso escalado:

En la figura I.18, para $R' = 4.8$ se obtiene un valor de i' de 10^{-2} .

Ajuste de la sobrepresión escalada y del impulso escalado por efectos geométricos y de situación:

El procedimiento anteriormente descrito es aplicable a una onda de presión completamente simétrica, que sería el resultado del estallido de un

recipiente esférico elevado, pero en la práctica muchos recipientes son cilíndricos y están ubicados próximos al suelo. Para tener en cuenta estos efectos, los resultados obtenidos deben multiplicarse por los factores de ajuste de las tablas I.10 y I.11. En este caso para la sobrepresión escalada los factores son 1.4 (por tratarse de un recipiente cilíndrico) y 1.1 (por estar situado cerca del suelo), mientras que el impulso escalado no se corrige. Por lo tanto:

$$P' = (1.4) (1.1) (4 \cdot 10^{-2}) = 0.062 \quad \text{(II.70)}$$

$$i' = 10^{-2} \quad \text{(II.71)}$$

Cálculo de la sobrepresión estática, P_s -ec. I.31- y del impulso, i -ec. I.45-:

$$P_s = P' P_0 = 6240 \text{ Pa} \quad \text{(II.72)}$$

$$i = \frac{i' P_0^{2/3} E_{\text{exp}}^{1/3}}{c_0} = 135 \text{ Pa}\cdot\text{s} \quad \text{(II.73)}$$

Comprobación del valor de la sobrepresión estática, P_s

El valor calculado de P_s se acepta al no superar la presión absoluta del recipiente antes del estallido (ver etapa 4A del apartado I.4.1).

II.4. 3. Cálculo de la distancia alcanzada por los fragmentos

Etapa 1. Estimación del número y masa de los fragmentos

Se trata de un calderín cilíndrico con extremos semiesféricos que estalla a causa de la sobrepresión. Se determinan todas las posibilidades de rotura -ver figura 2.14 y tabla I.12-, calculándose los alcances de un extremo semiesférico, del cuerpo cilíndrico abierto (carcasa) y, por último, de uno de los 18 fragmentos alargados (tiras) que produciría la rotura frágil de la misma. Para determinar la masa de cada fragmento se calcula la densidad superficial. Teniendo en cuenta que la masa del calderín es de 25 Tm y su superficie total de, aproximadamente, 85 m², se obtiene una densidad superficial de 290 kg/m². Así, las masas de los fragmentos son -ver tabla I.13-:

1.- Casquete semiesférico: $M_{tapa} = 3300 \text{ kg}$

2.- Carcasa abierta y casi plana: $M_{carcasa} = 18400 \text{ kg}$

3.- Cada uno de los 18 fragmentos del cuerpo central: $M_{tira} = 1000 \text{ kg}$

Etapa 2b. Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos con el método de Baum (para el caso de BLEVEs).

La velocidad inicial de los fragmentos (v_i , m/s) se calcula mediante la ecuación I.51:

$$v_i = \sqrt{\frac{2 A_{ke} E_{av}}{M_V}} = 108 \text{ m/s} \quad (\text{II. 74})$$

Donde A_{ke} es la fracción de energía liberada que se transforma en energía cinética de los fragmentos -en el caso de las BLEVES, *TNO (1997)* recomienda tomar $A_{ke} = 0.04$ -, E_{av} es la energía total liberada (J), calculada en la etapa 2 del método de Baker, y M_V (kg) es la masa del recipiente.

Como indica la figura I.19, se continúa en la etapa 4.

Etapa 4. Determinación del alcance de los fragmentos

En la tabla II.4 se obtienen los diferentes alcances de los fragmentos considerados. En todos los casos la velocidad inicial (v_i) es la calculada en la etapa anterior (108 m/s) y la densidad del aire es 1.2 kg/m^3 .

TABLA II.4. Alcance de los fragmentos que pueden formarse en la rotura de la caldera considerada

Tipo de fragmento	Factor de rozamiento (ver tabla I.15) $C_D A_D \text{ (m}^2\text{)}$	Velocidad inicial escalada. Ec. I.53: $v_i' = \frac{\rho_0 C_D A_D v_i^2}{M_f g}$	Alcance escalado de los fragmentos (R'_f) (Ver figura I.26)	Alcance de los fragmentos (R_f, m). Ec. I.54: $R_f = R'_f \frac{M_f}{\rho_0 C_D A_D}$
Tapa semiesférica ($M_f = 3300 \text{ kg}$)	2.7	1.17	0.9	920
Cuerpo cilíndrico abierto ($M_f = 18400 \text{ kg}$)	37	2.92	1.2	500
Una de las 18 tiras alargadas ($M_f = 2000 \text{ kg}$)	3.5	4.93	2.2	530

El alcance máximo de los fragmentos de la tabla II.4 es de 920 m.

II.4.4. Cálculo de las Zonas de Planificación

Siguiendo el esquema de la figura 5.9, se calcula en primer lugar la Zona de Alerta, que está condicionada por el umbral de impulso (ver tabla 5.6) de 40 Pa·s -ec. 5.38-:

$$i' = \frac{6.47}{E_{\text{exp}}^{1/3}} = 3.3 \cdot 10^{-3} \quad (\text{II.75})$$

a dicho impulso le corresponde un valor R' de 14 (ver figura I.18), y mediante la ecuación 5.39 se obtiene la distancia de Alerta ($r_{ZA(i)}$):

$$r_{ZA(i)} = 14 \left(\frac{E_{\text{exp}}}{P_0} \right)^{1/3} = 600 \text{ m} \quad (\text{II.76})$$

Al ser esta distancia menor que la correspondiente al alcance de los fragmentos, en este caso no se establece Zona de Alerta (caso R_{f1} -ver figuras 5.8 y 5.9).

En resumen:

Distancia de Intervención con o sin edificios: 920 m.

Distancia de Alerta: No se establece

ANEXO III. APLICACIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS DE CÁLCULO SELECCIONADOS AL ANÁLISIS DE ACCIDENTES REALES

En este capítulo se analizan varios accidentes acaecidos y se comparan las consecuencias de los mismos con las distancias correspondientes a las Zonas de Planificación propuestas en este trabajo. La información sobre dichos accidentes ha sido obtenida de la base de datos MARS 4.1 y de otras fuentes bibliográficas.

Cabe indicar que a pesar de haber seleccionado de las bases de datos consultadas los accidentes mejor documentados, no se ha dispuesto de toda la información necesaria para el cálculo y análisis de consecuencias. No obstante, se estima que los resultados globales ayudan y justifican la toma de decisiones para la propuesta de nuevos límites de las Zonas de Planificación presentada en este trabajo.

El capítulo se divide en dos partes. En el apartado III.1 se analiza la propuesta de los valores límite de sobrepresión e impulso, mientras que el apartado III.2 se comprueba la metodología de estimación del alcance de los fragmentos. Como se comenta en el anexo I, no se consideran los fragmentos tipo cohete, puesto que sobreestiman considerablemente la distancia alcanzada. En los apartados III.3 y III.4 se describen las metodologías de cálculo utilizadas para justificar los resultados encontrados relativos al alcance de la sobrepresión o impulso de los accidentes analizados en el apartado III.1 y el alcance de los fragmentos de los accidentes analizados en el apartado III.2.

III.1. ANÁLISIS DE ACCIDENTES SIN CONSIDERAR EL ALCANCE DE LOS FRAGMENTOS

III.1.1. Accidente 1: explosión de una nube de vapor en Flixborough (Reino Unido)

Escenario:

Fecha: 1 de Junio de 1974

Sustancia involucrada: Ciclohexano

Descripción del accidente: Explosión de una nube de 30000 kg de ciclohexano en la planta de Nypro en Flixborough.

Fuentes de información: *Riley (2004)*, *Sadee et al. (1976)* y *Hoiset et al. (2000)*.

Consecuencias:

Sobre personas: Fallecidos: 28, todos en el establecimiento (10 en el exterior de edificaciones y 18 por el colapso de la sala de control).

Heridos: 89, de los cuales 36 en el establecimiento y 53 en el exterior.

Sobre edificaciones: Todos los edificios en un radio de 500 m quedaron destruidos, mientras que 1821 casas resultaron afectadas con daños de diferente consideración, tales como hundimiento de techos, rotura de ventanas, etc. Además, 167 locales comerciales y varias fábricas también resultaron dañados. Algunos cristales se rompieron a varios kilómetros de distancia. Daños estructurales mayores hasta distancias de 800 ó 900 m. Roturas parciales de ventanas y desplazamiento de algunos marcos a 1190 m, pero sin daños estructurales mayores. Rotura del 20% de las ventanas a 2745 m.

Simulación:

Método utilizado: Multienergía, curva 10, en base a la información recogida en *Hoiset et al. (2000)*

Distancias obtenidas (utilizando los valores límite propuestos, tabla III.2):

Intervención sin edificios: 355 m.

Intervención con edificios: 1060 m.

Alerta: 3765 m.

Conclusiones:

1. A partir de las consecuencias descritas se deduce que la distancia correspondiente a la Zona de Intervención debe ser del orden de 900 m -límite de los daños estructurales mayores-, que se aproxima a la distancia calculada (1060 m). Dado que se produce la rotura del 20% de los cristales en edificios situados a 2745 m, la distancia de Alerta debe superar dicho valor. Se verifica esta condición, dado que la distancia calculada es de 3765 m. Si se calcula la distancia a la que se produce el 20% de daño estructural menor se obtiene aproximadamente 2000 m, que concuerda con la distancia observada experimentalmente.
2. Si se utilizan los valores límite de la *Directriz Básica (2003)*, la Zona de Alerta comenzaría a 550 m, que se aproxima a la distancia en la que resultaron destruidos todos los edificios, mientras que dicha zona terminaría a 1200 m, donde todavía se produjeron numerosos daños estructurales menores.

III.1.2. Accidente 2: explosión de una nube de vapor en Wesseling (Alemania)

Escenario:

Fecha: 18 de Enero de 1985

Sustancia involucrada: Propileno

Descripción del accidente: Explosión de nube de vapor de 4100 kg de propileno en la empresa Rheinische Olefinwerke.

Fuente de información: *Base de Datos MARS 4.1.*

Consecuencias:

Sobre personas: Fallecidos: Ninguno

Heridos: 43, todos dentro del establecimiento. No se dispone de información de la ubicación de los mismos (en el interior o en el exterior de edificios).

Sobre edificaciones: Daños estructurales en edificios en un radio de 200 m, derrumbe de paredes internas y externas en un radio de 400 m. 80% de ventanas rotas en las cercanías de la explosión, 50% entre 200 y 400 m, 20% entre 400 y 1000 m.

Simulación:

Método utilizado: Multienergía, curva 7, en base a la propuesta general de *TNO (1997)*, al no disponerse de información.

Distancias obtenidas (utilizando los valores límite propuestos, tabla III.2):

Intervención sin edificios: 190 m.

Intervención con edificios: 570 m.

Alerta: 2000 m.

Conclusiones:

1. Se produjo la rotura del 50% de cristales de edificaciones hasta una distancia de unos 400 m. Estas consecuencias son equivalentes al 1% de daño estructural mayor, que es el criterio propuesto para definir el límite de la Zona de Intervención para personas en el interior de edificios, que ha quedado determinada en 570 m, por lo que verifica la condición impuesta. En cuanto a la Zona de Alerta, se produce la rotura del 20% de los cristales en edificios situados a 1000 m; por consiguiente, la distancia de Alerta debe superar dicho valor. Se verifica esta condición, dado que la distancia calculada es de 2000 m. Con este criterio, si se calcula la distancia a la que se produciría el 20% de daño estructural menor se obtiene aproximadamente 1000 m, que coincide con la distancia observada experimentalmente.
2. Utilizando los valores límite de la *Directriz Básica (2003)*, se obtiene una distancia final de Intervención de 290 m, donde se produjeron daños estructurales mayores (derrumbe de paredes internas y externas de edificios). La distancia final de Alerta sería de 630 m, donde se produjo un 20% de rotura de ventanas, aproximadamente.

III.1.3. Accidente 3: detonación de materiales explosivos en Peterborough (Reino Unido)

Escenario:

Fecha: 22 de Marzo de 1989

Sustancia involucrada: Explosivos.

Descripción del accidente: Explosión de un camión cargado de explosivos, equivalentes a 800 kg de TNT, en la empresa Vibroplant Ltd.

Fuente de información: *Lees (1996)*.

Consecuencias:

Sobre personas: Fallecidos: 2

Heridos: Sin información del número, aunque se indican roturas de tímpano hasta distancias de 45 m

Sobre edificaciones: Daños a la estructura de los edificios en un radio de 110 m y ventanas rotas hasta una distancia de 580 m.

Simulación:

Método utilizado: TNT equivalente.

Distancias obtenidas (utilizando los valores límite propuestos, tabla III.1):

Intervención sin edificios: 65 m.

Intervención con edificios: 190 m.

Alerta: 650 m.

Conclusiones:

1. Las personas situadas en el exterior sufrieron rotura de tímpano hasta una distancia de 45 m. Estas consecuencias son las aceptadas para definir el límite de la Zona de Intervención sin edificios, que ha quedado determinada en 65 m, lo que verifica aceptablemente el criterio propuesto. Se producen daños a la estructura de edificaciones hasta una distancia aproximada de 110 m, lo que concuerda con la distancia de Intervención con edificios, establecida en 190 m. En cuanto a la Zona de Alerta, se

produce la rotura de los cristales en edificios situados en un radio de 580 m; la distancia de Alerta calculada se ajusta a ese valor, siendo de 650 m.

2. Con los valores límite de la *Directriz Básica (2003)* se obtiene una distancia final de Intervención de 93 m, a la que se produjeron daños en las estructuras de los edificios. La distancia final de Alerta sería de 230 m, donde se produjo la rotura de una gran cantidad de ventanas.

III.1.4. Accidente 4: explosión de una nube de vapor en Saint-Herblain (Francia)

Escenario:

Fecha: 7 de Octubre de 1991

Sustancia involucrada: Gasolina

Descripción del accidente: Explosión de nube de 6000 kg de gasolina en la empresa FINA. En el informe se indica que la cantidad de TNT equivalente de esta explosión es de 3600 kg.

Fuente de información: *Base de Datos MARS 4.1.*

Consecuencias:

Sobre personas: Fallecidos: 0
Heridos: 5 (2 en el establecimiento y 3 en un parking exterior)

Sobre edificaciones: El establecimiento quedó seriamente dañado, así como los vehículos y edificios de los alrededores. Se produjeron daños en tejados hasta 300 m, y la rotura de ventanas en un radio de 700 m.

Simulación:

Método utilizado: TNT equivalente, dado que la referencia proporciona la equivalencia citada.

Distancias obtenidas (utilizando los valores límite propuestos, tabla III.3):

Intervención sin edificios: 110 m.

Intervención con edificios: 310 m.

Alerta: 1100 m.

Conclusiones:

1. A partir de las consecuencias de la explosión, puede deducirse que los daños estructurales mayores se producen hasta una distancia de unos 300 m, lo que coincide con la distancia calculada como Zona de Intervención. La Zona de Alerta calculada supera la que corresponde a la rotura de cristales.
2. Con los valores límite de la *Directriz Básica (2003)* se obtiene una distancia final de Intervención de 150 m, a la que se produjeron daños en tejados, mientras que en el límite de Alerta, de 380 m, se produjo la rotura de gran cantidad de ventanas.

III.1.5. Accidente 5: estallido de un recipiente esférico en Beijing (China)

Escenario:

Fecha: 27 de Junio de 1997

Sustancia involucrada: Etileno

Descripción del accidente: Explosión de una esfera de etileno en una zona industrial en las afueras de Beijing.

Fuente de información: *Wang et al. (2000)*.

Consecuencias:

Sobre personas: Fallecidos: Sin información
Heridos: Sin información

Sobre edificaciones: Daños en paredes externas de edificios situados hasta aproximadamente 200 m. Ventanas rotas en un edificio a 245 m.

Simulación:

Métodos utilizados: Baker para recipientes (ver tabla III.4).

Distancias obtenidas (con los valores límite de sobrepresión e impulso propuestos):

Intervención con edificios: 230 m.

Alerta: 910 m

Conclusiones:

1. El límite de la Zona de Intervención para personas en el interior de edificios calculada a partir de los efectos de la onda de presión (sin tener en cuenta el alcance de los fragmentos) es de 230 m, superior a la distancia a la que se produjeron daños mayores en edificaciones (200 m). En este ejemplo se producen fragmentos, que se estudian en el apartado III.2.7, donde se indica que la distancia de Planificación queda determinada por el alcance máximo de los fragmentos (820 m). La Zona de Alerta se calcula en 910 m (caso R_{f2} de la figura 5.8).
2. Con los valores límite de sobrepresión e impulso de la *Directriz Básica (2003)* se obtiene una distancia final de Intervención de 130 m, a la que se produjeron daños mayores en edificaciones.

III.1.6. Accidente 6: detonación de material pirotécnico en Enschede (Holanda)

Escenario:

Lugar: Enschede (Holanda) Fecha: 13 de Mayo de 2000.

Sustancia involucrada: Material pirotécnico.

Descripción del accidente: Explosión de 100 toneladas de material pirotécnico almacenado en el interior de una edificación.

Fuentes de información: *Voogd (2004)*, *Kerle et. al. (2004)* y *Jenkins et al. (1980)*, de la que se obtiene la equivalencia másica del material pirotécnico con el TNT.

Consecuencias:

Sobre personas Fallecidos: 22
 Heridos: 950

Sobre edificaciones: Unas 600 viviendas del barrio residencial donde estaba ubicado el almacén resultaron severamente dañadas o destruidas, así como 40 comercios y 60 pequeñas fábricas. El área afectada cubría aproximadamente 2 km², resultando edificios dañados por la explosión hasta distancias de 700 u 800 m.

Simulación:

Método utilizado: TNT equivalente.

Distancias obtenidas (utilizando los valores límite propuestos, tabla III.1):

Intervención sin edificios: 260 m

Intervención con edificios: 740 m

Alerta: 2600 m.

Conclusiones:

1. A partir de los datos disponibles se puede deducir que los daños estructurales alcanzaron distancias de hasta 700 u 800 m, por lo que se estima que dicho límite coincide con el 1% de daño estructural mayor. Las mencionadas distancias están de acuerdo con la calculada como Zona de Intervención (740 m).
2. Con los valores límite de la *Directriz Básica (2003)* se obtendría una distancia final de Intervención de 370 m, que se encuentra dentro de la zona en la que los edificios resultaron seriamente dañados.

III.1.7. Accidente 7: explosión de una nube de vapor en Taiwán

Escenario:

Fecha: 18 de Mayo de 2001.

Sustancia involucrada: Resina acrílica.

Descripción del accidente: Explosión de una nube de vapor equivalente a 1000 kg de TNT debida a la fuga de sustancias acrílicas de un reactor.

Fuente de información: *Kao y Hu (2002)*.

Consecuencias:

Sobre personas Fallecidos: Ninguno
 Heridos: Más de 100

Sobre edificaciones: A distancias comprendidas entre 100 y 200 m del centro de la explosión se produjo la rotura de la mayoría de las ventanas de los edificios, así como daños de diversa consideración. Muchas ventanas se rompieron en un radio de 500 m.

Sobre edificaciones: Destrucción casi completa de edificios en un radio de 450 m. El colapso de un centro comercial a 320 m produjo un gran número de heridos, así como el de un taller de reparación de vehículos situado a 380 m. Un centro comercial situado a 450 m del origen sufrió grandes daños que ocasionaron la muerte de una persona, 10 heridos graves y 60 heridos leves. En el Liceo Profesional Gallieni, situado a más de 450 m, murió un estudiante por el colapso de una estructura de cemento y el edificio sufrió numerosos daños, requiriendo su reconstrucción. La empresa SNPE (Sociedad Nacional de Pólvora y Explosivos), situada a 750 m, sufrió daños muy graves en sus instalaciones generales, y una persona perdió la vida por la caída de una puerta metálica. Muchas otras construcciones resultaron afectadas, y algunas de ella tuvieron que ser evacuadas a causa del daño sufrido o por el riesgo de colapso (un hospital psiquiátrico, una escuela secundaria, viviendas, etc). En total, 25550 viviendas resultaron afectadas en distinto grado, de las cuales 11180 lo fueron seriamente. Más de 1200 familias tuvieron que ser realojadas. Se rompieron todas las ventanas en un radio de 1000 a 1500 m, y algunas hasta unos 4000 m.

Simulación:

Método utilizado: TNT equivalente.

Distancias obtenidas (utilizando los valores límite propuestos, tabla III.1):

Intervención sin edificios: 390 m

Intervención con edificios: 1100 m.

Alerta: 3900 m.

Conclusiones:

Se deduce de los datos recogidos que los daños estructurales menores alcanzan de 1000 a 1500 m. La distancia de Intervención calculada (1100 m) se encuentra entre ambas, aunque no es mayor. Esta aparente discrepancia puede ser debida a dos razones:

1. No se conoce con exactitud la cantidad de nitrato amónico implicada. Trabajos recientes (Dechy y Moilleau, 2004) indican que dicha cantidad podría situarse en las proximidades de las 400 toneladas, en lugar de las 300 consideradas.

2. La gran densidad de viviendas en la zona de influencia de la explosión puede incrementar los efectos de la misma debido a fenómenos de reflexión.

La distancia de Alerta calculada (3900 m) puede considerarse adecuada con relación a los daños ligeros referenciados (4000 m).

Si se utilizan los valores límite de la *Directriz Básica (2003)* se obtiene una distancia final de Intervención de 550 m, que es inferior a la que se produjo la muerte de varias personas como consecuencia del daño sufrido en y por los edificios del entorno, mientras que la distancia límite de Alerta, de 1400 m, es inferior a la que se produjo la rotura de todas las ventanas.

III.1.9. Accidente 9: estallido de un camión cisterna en Tivissa, Tarragona (España)

Escenario:

Fecha: 22 de Junio de 2002

Sustancia involucrada: Gas natural licuado

Descripción del accidente: Estallido de un camión cisterna al salirse de la carretera e incendiarse. La explosión fue equivalente a la producida por 75 kg de TNT.

Fuente de información: *Planas-Cuchi y cols. (2004)*.

Consecuencias:

Sobre personas Fallecidos: 1, conductor del camión.
 Heridos: 2

Sobre edificaciones: La onda de presión no rompió los cristales de una vivienda situada a 125 m.

Simulación:

Método utilizado: TNT equivalente, dado que la referencia proporciona la equivalencia citada.

Distancias obtenidas (con los valores límite de sobrepresión e impulso propuestos, tabla III.5):

Intervención con o sin edificios: No es necesario calcularla
Alerta: 135 m.

Conclusiones:

La distancia de Alerta calculada a partir de los efectos de la onda de presión es de 135 m, lo que está de acuerdo con que no se rompiesen las ventanas de una vivienda situada a 125 m. En este ejemplo se producen fragmentos, que se estudian en el apartado III.2.8, donde se indica que la distancia de Planificación queda determinada por su alcance máximo (280 m). Por lo tanto, no se establece Zona de Alerta (caso R_{fl} de la figura 5.8).

III.1.10. Accidente 10: detonación de materiales explosivos en Billy-Berclau (Francia)

Escenario:

Fecha: 27 de Marzo de 2003

Sustancia involucrada: Dinamita

Descripción del accidente: Explosión de 580 kg de dinamita en la empresa Nitrochimie. En el informe se indica que la cantidad de TNT equivalente es de 640 kg.

Fuente de información: *Base de Datos MARS 4.1.*

Consecuencias:

Sobre personas Fallecidos: 4 en el establecimiento y zonas adyacentes.
 Heridos: Sin información

Sobre edificaciones: Daño serio limitado a construcciones cercanas. Fin de daños mayores y rotura del 50% de las ventanas a 160 m. Rotura de cristales y otros daños menores hasta una distancia de 550 m.

Simulación:

Método utilizado: TNT equivalente.

Distancias obtenidas (utilizando los valores límite propuestos, tabla III.1):

Intervención sin edificios: 60 m

Intervención con edificios: 170 m

Alerta: 600 m.

Conclusiones:

1. A partir de las consecuencias descritas se deduce que la distancia correspondiente a Zona de Intervención con edificios debe ser igual o superior a 160 m, similar a la calculada (170 m). La Zona de Alerta debe estar entre 500 y 600 m, que se ajusta a la calculada (600 m).
2. Utilizando los valores límite de la *Directriz Básica (2003)* se obtiene una distancia final de Intervención de 85 m, inferior a la que se produjeron daños mayores en edificaciones, mientras que la se obtiene una distancia final de Alerta de 200 m, inferior a donde se produjeron daños menores y rotura de cristales.

III.2. ANÁLISIS DE ACCIDENTES QUE DIERON LUGAR A FRAGMENTOS

En este apartado se calcula el alcance de los fragmentos en nueve accidentes donde se produjo el estallido de recipientes utilizando la metodología propuesta en el apartado I.4.2 y se comparan los resultados con los alcances referenciados en la información publicada sobre cada uno de ellos. En los apartados III.2.7 y III.2.8 se establecen además las Zonas de Planificación, al tratarse de accidentes de los que se conocen los efectos de la onda de presión y que, por tanto, han sido evaluados también en el apartado III.1.

III.2.1. Accidente 11: estallido de un recipiente cilíndrico en Doe Run (Perú)

Escenario:

Fecha: 1962

Sustancia involucrada: Óxido de etileno

Descripción del accidente: Explosión de un recipiente cilíndrico de 2.7 x 8 m y 16000 kg de masa, como consecuencia de una descomposición en fase gas.

Fuente de información: *Lees (1996)*.

Consecuencias:

Fragmentos: La distancia indicada en la referencia es de 530 m.

Simulación y conclusiones:

Método utilizado: Metodología para la estimación del alcance máximo de los fragmentos (tablas III.6 y III.7).

Alcance máximo de los fragmentos: 735 m, que se aproxima a la información disponible (530 m).

III.2.2. Accidente 12: estallido de un recipiente esférico en Feyzin (Francia)

Escenario:

Fecha: 4 de Enero de 1966

Sustancia involucrada: Propano licuado

Descripción del accidente: Explosión de una serie de recipientes esféricos y cilíndricos (efecto dominó). Se calcula en este caso la BLEVE de una esfera de 13.3 m de diámetro y 220 Tm de masa, que contenía un 60% de líquido.

Fuente de información: *Base de Datos ARIA BARPI (2005).*

Consecuencias:

Fragmentos: La distancia indicada en la referencia es de 325 m para los fragmentos más grandes y entre 600 y 800 m para fragmentos de menor tamaño.

Simulación y conclusiones:

Método utilizado: Metodología para la estimación del alcance máximo de los fragmentos (tablas III.8 y III.9).

Alcance máximo de los fragmentos: 680 m, próximo a la información disponible (600-800 m).

III.2.3. Accidente 13: estallido de un recipiente cilíndrico -Baker (1977)-

Escenario:

Lugar: Varios Fecha: Varias

Sustancia involucrada: Propano licuado

Descripción del accidente: Serie de accidentes recogidos por Baker (1977).
Explosión de recipientes cilíndricos de 30000 kg de masa y medidas 3 x 16 m con presiones de fallo próximas a 10 bar.

Fuente de información: *Hauptmanns (2001a)*.

Consecuencias:

Fragmentos: La distancia indicada en la referencia es de 700 m.

Simulación y conclusiones:

Método utilizado: Metodología para la estimación del alcance máximo de los fragmentos (tablas III.10 y III.11).

Alcance máximo de los fragmentos: 860 m, próximo a la información disponible (700 m).

III.2.4. Accidente 14: estallido de un recipiente cilíndrico -Baker (1977)-

Escenario:

Lugar: Varios Fecha: Varias

Sustancia involucrada: Propano licuado

Descripción del accidente: Serie de accidentes recogidos por Baker (1977).
Explosión de recipientes cilíndricos de 30000 kg de masa y medidas 3 x 16 m con presiones de fallo próximas a 2.6 bar.

Fuente de información: *Hauptmanns (2001a)*.

Consecuencias:

Fragmentos: La distancia indicada en la referencia es de 450 m.

Simulación y conclusiones:

Método utilizado: Metodología para la estimación del alcance máximo de los fragmentos (tablas III.12 y III.13).

Alcance máximo de los fragmentos: 350 m, próximo a la información disponible (450 m).

III.2.5. Accidente 15: estallido de un camión cisterna en Los Alfaques (España)

Escenario:

Fecha: 11 de Julio de 1978.

Sustancia involucrada: Propileno

Descripción del accidente: Estallido de un camión cisterna de 45 m³ con 25 Tm de propileno a 8 bar. La cisterna era de acero al carbono T1A (fabricado según el código ASTM A 517-72a). La cisterna no tenía ningún sistema de alivio de presión.

Fuente de información: *GUIAR (2006)*.

Consecuencias:

Fragmentos: La distancia indicada en la referencia es de 300 m.

Simulación y conclusiones:

Método utilizado: Metodología para la estimación del alcance máximo de los fragmentos (tablas III.14 y III.15).

Alcance máximo de los fragmentos: 320 m, que es próximo a la información disponible (300 m).

III.2.6. Accidente 16: estallido de un recipiente esférico en San Juan Ixhuatepec (México)

Escenario:

Fecha: 19 de Noviembre de 1984.

Sustancia involucrada: Propano licuado

Descripción del accidente: Explosión de una serie de recipientes esféricos y cilíndricos (efecto dominó). Se calcula en este caso la BLEVE de una esfera de 14.5 m de diámetro y 155 Tm de masa, que contenía un 50% de líquido.

Fuente de información: *INERIS (2004)*.

Consecuencias:

Fragmentos: La distancia indicada en la referencia es de 600 m.

Simulación y conclusiones:

Método utilizado: Metodología para la estimación del alcance máximo de los fragmentos (tablas III.16 y III.17).

Alcance máximo de los fragmentos: 600 m, que coincide con la información disponible (600 m).

III.2.7. Accidente 17: estallido de un recipiente cilíndrico en Grangemouth (Reino Unido)

Escenario:

Fecha: 1987.

Sustancia involucrada: Gas

Descripción del accidente: Cilindro que contiene gas (la simulación se realiza con nitrógeno) de 3 x 8.5 m y 16000 kg de masa.

Fuente de información: *Lees (1996)*.

Consecuencias:

Fragmentos: La distancia indicada en la referencia es de 560 m.

Simulación y conclusiones:

Método utilizado: Metodología para la estimación del alcance máximo de los fragmentos (tablas III.18 y III.19).

Alcance máximo de los fragmentos: 450 m, considerado aceptable con respecto a la información disponible (560 m).

III.2.8. Accidente 5: estallido de un recipiente esférico en Beijing (China)

Escenario:

Fecha: 27 de Junio de 1997

Sustancia involucrada: Etileno

Descripción del accidente: Explosión de una esfera de etileno en una zona industrial en las afueras de Beijing.

Fuente de información: *Wang et al. (2000).*

Consecuencias:

Fragmentos: La esfera se rompió en 7 fragmentos, con masas desde 7500 kg hasta 46000 kg. La distancia máxima alcanzada fue de 840 m, que corresponde a un fragmento de unas 14 Tm.

Simulación:

Método utilizado: Metodología para la estimación del alcance máximo de los fragmentos (tablas III.20 y III.21).

Alcance máximo de los fragmentos: 820 m, que es la Zona de Intervención con o sin edificios.

Conclusiones:

La distancia de Planificación queda determinada por el alcance máximo de los fragmentos, que se calcula en 820 m, aproximadamente coincidente con la constatada (840 m).

III.2.9. Accidente 9: estallido de un camión cisterna en Tivissa, Tarragona (España)

Escenario:

Fecha: 22 de Junio de 2002

Sustancia involucrada: Gas natural licuado

Descripción del accidente: Estallido de un camión cisterna al salirse de la carretera e incendiarse. La explosión fue equivalente a la producida por 75 kg de TNT.

Fuente de información: *Planas-Cuchi y cols. (2004).*

Consecuencias:

Fragmentos: El impacto de un gran fragmento produjo serios daños en una vivienda situada a 125 m, como el derrumbe de parte del tejado y de una pared. Se generaron tres grandes fragmentos, uno de los cuales recorrió una distancia de 257 m sin impactar contra ningún elemento vulnerable.

Simulación:

Método utilizado: Metodología para la estimación del alcance máximo de los fragmentos (tablas III.22 y III.23).

Alcance máximo de los fragmentos: 280 m, que es la Zona de Intervención con o sin edificios. En este caso no se establece Zona de Alerta.

Conclusiones:

La distancia de Intervención (280 m) viene determinada por el alcance máximo de los fragmentos, que se ajusta bien a la información disponible (257 m).

III.3. METODOLOGÍAS DE CÁLCULO PARA LOS ACCIDENTES ANALIZADOS EN EL APARTADO III.1

A continuación se recogen los cálculos para establecer las Zonas de Planificación de los accidentes anteriores, que han sido realizados de acuerdo con la propuesta recogida en el capítulo 5.

Los diez accidentes analizados han sido agrupados en tablas en función del tipo de explosión y del método utilizado para calcular las Zonas de Planificación. La tabla III.1 recoge las detonaciones de sustancias explosivas calculadas con el método de TNT equivalente. En la tabla III.2 se incluyen las explosiones de nubes de vapor calculadas con el método Multienergía y en la III.3 las calculadas con el método TNT equivalente. Por último, las tablas III.4 y III.5 recogen el estallido de una esfera calculado con el método de Baker y el de un camión cisterna calculado con el método TNT equivalente, respectivamente.

Los accidentes se identifican con la misma numeración utilizada en el apartado III.1.

III.3.1. Detonación de explosivos

Las ecuaciones utilizadas y los resultados obtenidos se recogen en la tabla III.1.

TABLA III.1. Zonas de planificación de accidentes provocados por la detonación de sustancias explosivas y calculados con el método de TNT equivalente

Nº Acci-dente	Masa de sustancia explosiva	W_{TNT} (kg)	Umbral ZI_{edf} (seleccionado en la tabla 5.6)	Umbral ZA (tabla 5.6)	Zona de Intervención con edificios (ecuación 5.14)	Zona de Alerta (ecuación 5.18)	Zona de Intervención sin edificios (ecuación 5.17)
3	Sólo se indica W_{TNT}	800	Sobrepresión (6000 Pa).	Sobrepresión (1300 Pa).	$r_{ZI(P)edf} = 20 W_{TNT}^{1/3} = 190 \text{ m}$	$r_{ZA(P)} = 70 W_{TNT}^{1/3} = 650 \text{ m}$	$r_{ZI \text{ sin } edf} = 7 W_{TNT}^{1/3} = 65 \text{ m}$
6	100 Tm, con una equivalencia de 0.5	50000	Sobrepresión (6000 Pa).	Sobrepresión (1300 Pa).	$r_{ZI(P)edf} = 20 W_{TNT}^{1/3} = 740 \text{ m}$	$r_{ZA(P)} = 70 W_{TNT}^{1/3} = 2600 \text{ m}$	$r_{ZI \text{ sin } edf} = 7 W_{TNT}^{1/3} = 260 \text{ m}$
8	300 Tm, con una equivalencia de 0.56	168000	Sobrepresión (6000 Pa).	Sobrepresión (1300 Pa).	$r_{ZI(P)edf} = 20 W_{TNT}^{1/3} = 1100 \text{ m}$	$r_{ZA(P)} = 70 W_{TNT}^{1/3} = 3860 \text{ m}$	$r_{ZI \text{ sin } edf} = 7 W_{TNT}^{1/3} = 390 \text{ m}$
10	550 kg, con una equivalencia de 1.16	640	Sobrepresión (6000 Pa).	Sobrepresión (1300 Pa).	$r_{ZI(P)edf} = 20 W_{TNT}^{1/3} = 170 \text{ m}$	$r_{ZA(P)} = 70 W_{TNT}^{1/3} = 600 \text{ m}$	$r_{ZI \text{ sin } edf} = 7 W_{TNT}^{1/3} = 60 \text{ m}$

W_{TNT} : Masa de TNT equivalente

ZI_{edf} : Zona de Intervención con edificios

ZA: Zona de Alerta

III.3.2. Explosión de nubes de vapor

En las tablas III.2 y III.3 se recogen las explosiones de nubes de vapor calculadas con el método Multienergía y con el del TNT equivalente, respectivamente.

TABLA III.2. Zonas de Planificación de accidentes provocados por la explosión de nubes de vapor calculados con el método Multienergía

Nº Accidente	N	W_c , ΔH_c y E_{exp}	Umbral ZI_{edf} (seleccionado en la tabla 5.6)	Umbral ZA (tabla 5.6)	Zona de Intervención con edificios (ecuación 5.24)	Zona de Alerta (ecuación 5.28)	Zona de Intervención sin edificios (para $P_s = 22500$ Pa en las curvas 6-10 de la figura I.5 se obtiene $R' = 1.5$, y se usa la ecuación 5.27)
1	10	$W_c = 30000$ kg de ciclohexano $\Delta H_c = 4.4 \cdot 10^7$ J/kg $E_{exp} = W_c \Delta H_c = 1.32 \cdot 10^{12}$ J	Sobrepresión (6000 Pa). Figura I.5 para N=10 $R' = 4.5$	Sobrepresión (1300 Pa). Figura I.5 para N=10 $R' = 16$	$r_{ZI(P)edf} = 4.5 \left(\frac{E_{exp}}{10^5} \right)^{1/3} = 1060$ m	$r_{ZA(P)} = 16 \left(\frac{E_{exp}}{10^5} \right)^{1/3} = 3765$ m	$r_{ZI \text{ sin edf}} = 1.5 \left(\frac{E_{exp}}{P_0} \right)^{1/3} = 350$ m
2	7	$W_c = 4100$ kg de propileno $\Delta H_c = 4.9 \cdot 10^7$ J/kg $E_{exp} = W_c \Delta H_c = 2 \cdot 10^{11}$ J	Sobrepresión (6000 Pa). Figura I.5 para N=7 $R' = 4.5$	Sobrepresión (1300 Pa). Figura I.5 para N=7 $R' = 16$	$r_{ZI(P)edf} = 4.5 \left(\frac{E_{exp}}{P_0} \right)^{1/3} = 567$ m	$r_{ZA(P)} = 16 \left(\frac{E_{exp}}{10^5} \right)^{1/3} = 2020$ m	$r_{ZI \text{ sin edf}} = 1.5 \left(\frac{E_{exp}}{P_0} \right)^{1/3} = 190$ m

N: Nivel de la explosión a utilizar en la figura I.5.

E_{exp} : Energía de la explosión

W_c : Masa de sustancia combustible (kg)

ΔH_c : Entalpía de combustión (J/kg)

TABLA III.3. Zonas de Planificación de accidentes provocados por la explosión de nubes de vapor calculados con el método TNT equivalente

Nº Acci- dente	W_{TNT} (kg)	Umbral ZI_{edf} (seleccionado en la tabla 5.6)	Umbral ZA (tabla 5.6)	ZI_{edf} (ecuación 5.14)	ZA (ecuación 5.18)	$ZI_{sin\ edf}$ (ecuación 5.17)
4	3600	Sobrepresión (6000 Pa).	Sobrepresión (1300 Pa).	$r_{ZI(P)edf} = 20 W_{TNT}^{1/3} =$ $= 310\ m$	$r_{ZA(P)} = 70 W_{TNT}^{1/3} =$ $= 1070\ m$	$r_{ZI\ sin\ edf} = 7 W_{TNT}^{1/3} =$ $= 110\ m$
7	1000	Sobrepresión (6000 Pa).	Sobrepresión (1300 Pa).	$r_{ZI(P)edf} = 20 W_{TNT}^{1/3} =$ $= 200\ m$	$r_{ZA(P)} = 70 W_{TNT}^{1/3} =$ $= 700\ m$	$r_{ZI\ sin\ edf} = 7 W_{TNT}^{1/3} =$ $= 70\ m$

III.3.3. Estallido de recipientes

En este apartado se incluyen los accidentes provocados por el estallido de recipientes industriales. El accidente 5 (tabla III.4) corresponde al estallido de una esfera de unos 11 m de diámetro calculado con el método de Baker, mientras que en el accidente 9 (estallido de un camión cisterna, tabla III.5) se utiliza el método del TNT equivalente.

TABLA III.4. Zonas de Planificación con los valores límite de sobrepresión o impulso para el accidente 5 (método de Baker)

E_{exp} (J)	Umbrales para las Zonas de Planificación (tabla 5.6)	Zona de Alerta (con la ecuación 5.35, sin tener en cuenta el alcance de los fragmentos)	Zona de Intervención con edificios (con la ecuación 5.41, sin tener en cuenta el alcance de los fragmentos)
$2.8 \cdot 10^{10}$	Zona de Alerta: ($P_s = 1300$ Pa) Zona de Intervención: ($P_s = 6000$ Pa)	$r_{ZA(P)} = 0.3E_{exp}^{1/3} = 910$ m	$r_{ZI(P)_{edf}} = 0.075E_{exp}^{1/3} = 230$ m

TABLA III.5. Zonas de Planificación con los valores límite de sobrepresión o impulso para el accidente 9 (método TNT equivalente)

W_{TNT} (kg)	Umbral ZA (tabla 5.6)	Distancia escalada (z')	Zona de Alerta (con la ecuación 5.20, sin tener en cuenta el alcance de los fragmentos)
75	Impulso: $i = 40$ Pa·s Escalado (con la ecuación 5.19): $i_{TNT} = \frac{40}{W_{TNT}^{1/3}} = 9.5$	Con $i_{TNT} = 9.5$, en la figura I.3 $z' = 32$	$r_{ZA(i)} = 32 W_{TNT}^{1/3} = 135$ m

III.4. METODOLOGÍAS DE CÁLCULO PARA LOS ACCIDENTES ANALIZADOS EN EL APARTADO III.2

En este apartado se incluyen los cálculos necesarios para determinar el alcance de los fragmentos de cada uno de los accidentes indicados en el apartado III.2 presentados en dos tablas. En la primera se determina la velocidad inicial de los fragmentos siguiendo la metodología recogida en la figura I.16, y en la segunda se calcula el alcance de los fragmentos.

Si se comparan los resultados obtenidos con los alcances observados, puede determinarse que la metodología es aceptable, puesto que las diferencias no superan en ningún caso el 40%.

TABLA III.6. Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos para el accidente Doe Run, 1962 (apartado III.2.1).

Presión de rotura	Contenido del recipiente	E_{av} (J)	Cilindro			v_i (m/s) Método de Baker-Gelfand (etapa 2a del apartado I.4.2)
			L_V (m)	d_V (m)	M_V (Tm)	
$P_1 \approx 63$ bar	Gas (es descomposición de óxido de etileno en fase gas). Se elige etileno gas: explosión interna o reacción fuera de control	$1.4 \cdot 10^9$	2.7	8	9	$v_i = 129$ m/s

Nota: E_{av} es la energía liberada en la expansión (J), calculada con el método de Baker (apartado I.4.1), d_V el diámetro del recipiente (m), L_V su longitud (m), M_V su masa vacío (kg) y v_i la velocidad inicial de los fragmentos (m/s).

TABLA III.7. Alcance de los fragmentos para el accidente Doe Run, 1962 (apartado III.2.1).

	M_f (kg) (tabla I.13)	C_{DA_D} (tabla I.15)	v'_i (ecuación I.53)	R'_f (figura I.26)	R_f (m) (ecuación I.54)	Alcance citado por la referencia (m)
Extremo semiesférico	1140	3.5	6.3	2.7	735	530
Carcasa abierta	6700	40	12	3.2	450	
Tira alargada	370	3.7	20.2	3.6	300	

Nota: M_f es la masa del fragmento (kg), C_{DA_D} es el factor de rozamiento (m^2), v'_i es la velocidad inicial escalada, R'_f es el alcance de los fragmentos escalado y R_f es el alcance de los fragmentos (m).

TABLA III.8. Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos para el accidente Feyzin, 1966 (apartado III.2.2).

Presión de rotura	Contenido del recipiente	E_{av} (J)	Esfera		v_i (m/s). BLEVE, (ecuación I.51, etapa 2b) Método de Baum
			d_v (m)	M_v (Tm)	
$P_1 \approx 21$ bar	Mezcla líquido-vapor de propano al 60% de volumen	$2.4 \cdot 10^{10}$ J	13,3	220	$v_i = \sqrt{\frac{2 A_{ke} E_{av}}{M_v}} = 94 \text{ m/s}$

TABLA III.9. Alcance de los fragmentos para el accidente Feyzin, 1966 (apartado III.2.2).

	M_f (kg) (tabla I.13)	$C_D A_D$ (tabla I.15)	v'_i (ecuación I.53)	R'_f (figura I.26)	R_f (m) (ecuación I.54)	Alcance citado por la referencia bibliográfica (m)
Fragmento prácticamente plano	22000	32.5	1.6	1.2	680	Los fragmentos más grandes a 325 m, pero se encuentran otros a distancias entre 600 y 800 m.

TABLA III.10. Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos para accidentes recopilados por Baker, 1977 (apartado III.2.3).

Presión de rotura	Contenido del recipiente	E_{av} (J)	Cilindro			v_i (m/s). (ecuación I.51, etapa 2b) Método de Baum
			L_v (m)	d_v (m)	M_v (Tm)	
$P_1 = 10$ bar	Mezcla líquido-vapor de propano al 50% de volumen	$1.2 \cdot 10^9$	16	3	30	$v_i = \sqrt{\frac{2 A_{ke} E_{av}}{M_v}} = 128$ m/s

TABLA III.11. Alcance de los fragmentos para accidentes recopilados por Baker, 1977 (apartado III.2.3).

	M_f (kg) (tabla I.13)	$C_D A_D$ (tabla I.15)	v'_i (ecuación I.53)	R'_f (figura I.26)	R_f (m) (ecuación I.54)	Alcance citado por la referencia bibliográfica (m)
Extremo semiesférico	2400	4.3	3.7	1.9	860	700
Carcasa abierta	25300	88	7	2.8	670	
Tira alargada	1400	8.3	12	3.2	450	

TABLA III.12. Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos para accidentes recopilados por Baker, 1977 (apartado III.2.4).

Presión de rotura	Contenido del recipiente	E_{av} (J)	Cilindro			v_i (m/s). (ecuación I.51, etapa 2b) Método de Baum
			L_v (m)	d_v (m)	M_v (Tm)	
$P_1 = 2.6$ bar	Mezcla líquido-vapor de propano al 50% de volumen	$3 \cdot 10^8$	16	3	30	$v_i = \sqrt{\frac{2 A_{ke} E_{av}}{M_v}} = 64$ m/s

TABLA III.13. Alcance de los fragmentos para accidentes recopilados por Baker, 1977 (apartado III.2.4).

	M_f (kg) (tabla I.13)	$C_D A_D$ (tabla I.15)	v'_i (ecuación I.53)	R'_f (figura I.26)	R_f (m) (ecuación I.54)	Alcance citado por la referencia bibliográfica (m)
Extremo semiesférico	2400	4.3	0.9	0.75	350	450
Carcasa abierta	25300	88	1.7	1.15	270	
Tira alargada	1400	8.3	2.9	1.6	230	

TABLA III.14. Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos para el accidente Camping Los Alfaques, 1978 (apartado III.2.5).

<i>Presión de rotura</i>	<i>Contenido del recipiente</i>	E_{av} (J)	Cilindro			v_i (m/s). (ecuación I.51, etapa 2b) Método de Baum
			L_V (m)	d_V (m)	M_V (Tm)	
$P_1 \approx 8$ bar	Mezcla líquido-vapor de propileno al 50% de volumen	$3.8 \cdot 10^8$	2.5	8	5	$v_i = \sqrt{\frac{2 A_{ke} E_{av}}{M_V}} = 78$ m/s

TABLA III.15. Alcance de los fragmentos para el accidente Camping Los Alfaques, 1978 (apartado III.2.5).

	M_f (kg) (tabla I.13)	$C_D A_D$ (tabla I.15)	v'_i (ecuación I.53)	R'_f (figura I.26)	R_f (m) (ecuación I.54)	Alcance citado por la referencia bibliográfica (m)
Extremo semiesférico	600	3	3.7	1.9	320	300
Carcasa abierta	3800	37	7.3	2.8	240	
Tira alargada	210	3.5	12.5	3.4	170	

TABLA III.16. Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos para el accidente San Juan Ixhuatepec, 1984 (apartado III.2.6).

Presión de rotura	Contenido del recipiente	E_{av} (J)	Esfera		v_i (m/s). BLEVE, (ecuación I.51, etapa 2b del apartado I.4.2) Método de Baum
			d_v (m)	M_V (Tm)	
$P_1 \approx 15$ bar	Mezcla líquido-vapor de propano al 50% de volumen	$2.2 \cdot 10^{10}$ J	14,5	155	$v_i = \sqrt{\frac{2 A_{ke} E_{av}}{M_V}} = 106 \text{ m/s}$

TABLA III.17. Alcance de los fragmentos para el accidente San Juan Ixhuatepec, 1984 (apartado III.2.6).

	M_f (kg) (tabla I.13)	$C_D A_D$ (tabla I.15)	v'_i (ecuación I.53)	R'_f (figura I.26)	R_f (m) (ecuación I.54)	Alcance citado por la referencia bibliográfica (m)
Fragmento prácticamente plano	15500	38.6	3.4	1.8	600	600

TABLA III.16. Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos para el accidente Grangemouth, 1987 (apartado III.2.7).

<i>Presión de rotura</i>	<i>Contenido del recipiente</i>	E_{av} (J)	Cilindro			v_i (m/s) Método de Baker-Gelfand
			L_V (m)	d_V (m)	M_V (Tm)	
$P_1 \approx 50$ bar	Gas	$9 \cdot 10^8$	3	8.5	16	$v_i = 82$ m/s

TABLA III.17. Alcance de los fragmentos para el accidente Grangemouth 1987 (apartado III.2.7).

	M_f (kg) (tabla I.13)	$C_D A_D$ (tabla I.15)	v'_i (ecuación I.53)	R'_f (figura I.26)	R_f (m) (ecuación I.54)	Alcance citado por la referencia bibliográfica (m)
Extremo semiesférico	2100	4.3	1.7	1.13	450	560
Carcasa abierta	11800	47	3.2	1.7	360	
Tira alargada	660	4.4	5.5	2.7	330	

TABLA III.18. Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos para el accidente 5 (apartado III.2.8).

E_{av} (J)	Esfera		v_i (m/s). BLEVE (ecuación I.51, etapa 2b) Método de Baum
	d_V (m)	M_V (Tm)	
$2.8 \cdot 10^{10}$	12.5	141.4	$v_i = \sqrt{\frac{2 A_{ke} E_{av}}{M_V}} = 125 \text{ m/s}$

E_{av} : Energía liberada en la expansión (J). Se toma la proporcionada por la referencia bibliográfica -apartado III.2.7-.

TABLA III.19. Alcance de los fragmentos y Zonas de Planificación para el accidente 5 (apartado III.2.8).

	M_f (kg) (tabla I.13)	$C_D A_D$ (tabla I.15)	v'_i (ecuación I.53)	R'_f (figura I.26)	R_f (m) (ecuación I.54)	Zonas de Planificación (Caso R_{f2} de la figura 5.8)
10 fragmentos prácticamente planos	14140	28.7	3.9	2	820	La referencia indica que los fragmentos alcanzaron 840 m. La distancia de Intervención es de 820 m, y la de Alerta de 910 m

TABLA III.20. Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos para el accidente 9 (apartado III.2.9).

E_{av} (J)	Cilindro			v_i (m/s). BLEVE, (ecuación I.51, etapa 2b) Método de Baum
	L_V (m)	d_V (m)	M_V (Tm)	
$3.45 \cdot 10^8$	10	2.5	5	$v_i = \sqrt{\frac{2 A_{ke} E_{av}}{M_V}} = 74 \text{ m/s}$

E_{av} : Energía liberada en la expansión (J). Se toma la proporcionada por la referencia bibliográfica -apartado III.2.8-, equivalente a 75 kg de TNT.

TABLA III.21. Alcance de los fragmentos y Zonas de Planificación para el accidente 9 (apartado III.2.9).

	M_f (kg) (tabla I.13)	$C_D A_D$ (tabla I.15)	v'_i (ecuación I.53)	R'_f (figura I.26)	R_f (m) (ecuación I.54)	Zonas de Planificación (Caso R_{f1} de la figura 5.8)
Extremo semiesférico	475	2.6	3.6	1.8	280	La referencia indica que los fragmentos alcanzaron 257 m. La distancia de Intervención es de 280 m, y no se establece Zona de Alerta
Carcasa abierta	4050	57	9.5	3	180	
Tira alargada	225	5.4	16.1	3.5	120	

ANEXO IV. LA FUNCIÓN PROBIT APLICADA A LOS ACCIDENTES DE TIPO MECÁNICO

La respuesta de un grupo de individuos a un mismo tipo de estímulo no es homogénea, presentando un comportamiento estadístico que se ajusta, aproximadamente, a una distribución logarítmico-normal. Este tipo de respuesta se produce también cuando se trata de cuantificar los daños provocados por fenómenos peligrosos -toxicidad, radiación térmica, explosiones...-, habiendo sido constatada con animales de investigación y seres humanos, aunque en este último caso la distribución es más amplia, lo que demuestra mayores diferencias en los humanos (*González Ferradás et al., 2002*).

Finney (1971) ha propuesto una metodología simplificada para cuantificar los daños sobre poblaciones a través de la función PROBIT (PROBability unIT) -Y- relacionándola linealmente con el logaritmo de la magnitud que provoca el daño - δ - en la forma:

$$Y = \frac{\ln(\delta) - \mu_P}{\sigma_P} + 5 \quad (\text{IV.1})$$

donde μ_P y σ_P representan la media y la desviación típica de la distribución. La forma habitual de expresar la ecuación anterior utilizada en los análisis de consecuencias viene dada mediante:

$$Y = k_1 + k_2 \ln(\delta) \quad (\text{IV.2})$$

donde k_1 y k_2 son parámetros constantes para cada tipo de daño, que deben determinarse experimentalmente.

En el caso de las explosiones, el daño, en la mayoría de los casos, está provocado por dos magnitudes, la sobrepresión, P_s , y el impulso mecánico, i , por lo que δ refleja dicho comportamiento. En este trabajo se consideran los daños a los seres humanos y a las edificaciones; en el primer caso, los considerados son la rotura de tímpano, y los traumatismos mortales por desplazamiento e impacto con el cráneo, por desplazamiento e impacto con el cuerpo y por hemorragia pulmonar. Con respecto a los edificios, los tipos de daño que se tienen en cuenta son los estructurales menores, los estructurales mayores, y el colapso.

El daño por rotura de tímpano sólo depende de la sobrepresión de la onda explosiva. En el resto, el daño se produce por la combinación de la sobrepresión y del impulso que se agrupan en una nueva variable S (que coincide con el parámetro δ de la expresión IV.2). Dicha variable adopta un valor diferente, dependiendo del daño considerado.

En este trabajo se utilizan las siguientes expresiones -TNO (1989)-:

- Para rotura de tímpano:

$$Y = -12.6 + 1.52 \ln P_s \quad (3.2)$$

- Para muerte por hemorragia de pulmón:

$$Y = 5.0 - 5.74 \ln S \quad (IV.3)$$

siendo:

$$S = \frac{4.2}{P'} + \frac{1.3}{i_{esc}} \quad (IV.4)$$

donde P' e i_{esc} se definen mediante las expresiones 3.7 y 3.8. De esta manera, para una persona de 70 kg de masa, la expresión IV.3, en función de la presión efectiva (P_{ef}) y del impulso (i), queda de la siguiente forma:

$$Y = 5 - 5.74 \ln \left(\frac{4.2 \cdot 10^5}{P_{ef}} + \frac{1694}{i} \right) \quad (IV.5)$$

Conviene indicar que el caso más conservador consiste en considerar la presión efectiva igual a la reflejada (ver apartado 3.1.2).

- Para muerte por desplazamiento e impacto con el cráneo:

$$Y = 5 - 8.49 \ln S \quad (IV.6)$$

donde:

$$S = \frac{2.43 \cdot 10^3}{P_s} + \frac{4 \cdot 10^8}{P_s i} \quad \text{Válida para } P_s < 4 \cdot 10^5 \text{ Pa} \quad (IV.7)$$

- Para muerte por desplazamiento e impacto con todo el cuerpo:

$$Y = 5 - 2.44 \ln S \quad (IV.8)$$

donde:

$$S = \frac{7.38 \cdot 10^3}{P_s} + \frac{1.3 \cdot 10^9}{P_s \cdot i} \quad \text{Válida para } P_s < 4 \cdot 10^5 \text{ Pa} \quad (\text{IV.9})$$

- Para daños estructurales menores en edificios:

$$Y = 5 - 0.26 \ln S \quad (\text{IV.10})$$

donde:

$$S = \left(\frac{4600}{P_s} \right)^{3.9} + \left(\frac{110}{i} \right)^5 \quad (\text{IV.11})$$

- Para daños estructurales mayores en edificios:

$$Y = 5 - 0.26 \ln S \quad (\text{IV.12})$$

donde:

$$S = \left(\frac{17500}{P_s} \right)^{8.4} + \left(\frac{290}{i} \right)^{9.3} \quad (\text{IV.13})$$

- Para colapso de edificios:

$$Y = 5 - 0.22 \ln S \quad (\text{IV.14})$$

donde:

$$S = \left(\frac{40000}{P_s} \right)^{7.4} + \left(\frac{460}{i} \right)^{11.3} \quad (\text{IV.15})$$

Con el valor PROBIT se determina el porcentaje de la población expuesta que resultará afectada por el daño considerado, según se indica en la tabla IV.1, que es aplicable a cualquier tipo de daño.

TABLA IV.1. Relación de los valores PROBIT y los porcentajes de población o edificios afectados (*TNO, 1989*)

		Entrada de unidades de % de afectados										Valor de la función PROBIT
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Entrada de decenas de % de afectados	%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	0	...	2.67	2.95	3.12	3.25	3.36	3.45	3.52	3.59	3.66	
	10	3.72	3.77	3.82	3.87	3.92	3.96	4.01	4.05	4.08	4.12	
	20	4.16	4.19	4.23	4.26	4.29	4.33	4.36	4.39	4.42	4.45	
	30	4.48	4.50	4.53	4.56	4.59	4.61	4.64	4.67	4.69	4.72	
	40	4.75	4.77	4.80	4.82	4.85	4.87	4.90	4.92	4.95	4.97	
	50	5.00	5.03	5.05	5.08	5.10	5.13	5.15	5.18	5.20	5.23	
	60	5.25	5.28	5.31	5.33	5.36	5.39	5.41	5.44	5.47	5.50	
	70	5.52	5.55	5.58	5.61	5.64	5.67	5.71	5.74	5.77	5.81	
	80	5.84	5.88	5.92	5.95	5.99	6.04	6.08	6.13	6.18	6.23	
	90	6.28	6.34	6.41	6.48	6.55	6.64	6.75	6.88	7.05	7.33	
	%	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	
	99	7.33	7.37	7.41	7.46	7.51	7.58	7.65	7.75	7.88	8.09	

Para el caso de los edificios, al tratarse del mismo tipo de daño pero con niveles diferentes, pueden obtenerse resultados aparentemente anómalos que deben interpretarse (*González Ferradás et al., 2002*). Así, por ejemplo, considerando una sobrepresión de 12000 Pa, un impulso de 5000 Pa·s y aplicando las ecuaciones IV.10 a IV.15 y la tabla IV.1, se obtiene:

Daños estructurales menores:

$$Y = 5.97 \quad \text{Porcentaje de edificaciones afectadas} = 84\%$$

Daños estructurales mayores:

$$Y = 4.18 \quad \text{Porcentaje de edificaciones afectadas} = 20\%$$

Colapso:

$$Y = 3.04 \quad \text{Porcentaje de edificaciones afectadas} = 2\%$$

La suma de los porcentajes de edificaciones afectadas es 106%. Esto se interpreta considerando que un nivel de daño superior está incluido en el inmediato inferior, por lo que los porcentajes corregidos se calculan de la forma siguiente:

1. Se parte del correspondiente nivel de daño superior, que no se modifica. En este caso corresponde al colapso del 2% de los edificios.
2. Los edificios afectados por daños estructurales mayores se determinan por diferencia de su porcentaje y el anterior, esto es:

Daños estructurales mayores: $20 - 2 = 18\%$

3. El porcentaje de daños estructurales menores se calcula mediante:

Daños estructurales menores: $84 - 20 = 64\%$

4. El 16% ($100\% - 84\%$) no sufre daños.
5. Ahora la suma de porcentajes ($2 + 18 + 64 + 16$) coincide con el 100%.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar Bartolomé, F.; (1978). *Los explosivos y sus aplicaciones*. Ed. Labor S.A, Barcelona.
- Anderson, R.; (2005). *Field fire causes LP tank explosion*. Daily Review Atlas, 31 March 2005. En línea. [Consultado 20 enero 2006]. Disponible en: <http://www.fire.uni-freiburg.de/media/2005/news_20050401_us.htm>
- Arrêté du 29 septembre 2005 *relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation*. Journal Officiel 234 du 7 octobre 2005. Francia.
- Baker, Q.A., Tang, M.J., Scheier, E.A., Silva, G.J.; (1996). *Vapour Cloud Explosion Analysis*. Process Safety Progress, 15, No 2, 106-109.
- Baker, W.E., Cox, P.A., Westine, P.S.; (1983). *Explosion hazards and evaluation*. Elsevier scientific publishing company, Amsterdam.
- Baker, W.E., Kulesz, J.J., Ricker, R.E., Bessey, R.L., Westine, P.S., Parr, V.B., Oldham, G.A. (1977). *Workbook for predicting pressure wave and fragment effects of exploding propellant tanks and gas storage vessels*. Washington, D. C.: NASA CR-134906, NASA Scientific and Technical Information Office, EE.UU.
- Baquero, J., Llorente, V.; (1985). *Equipos para la industria química y alimentaria*. Editorial Alhambra, Madrid.
- Baum, M.R.; (2001). *The velocity of large missiles resulting from axial rupture of gas pressurised cylindrical vessels*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 14 (2001) 199-203.
- Bjerketvedt, D., Roar Bakke, J., van Wingerden, k.; (1992). *Gas Explosion Handbook*. Christian Michelsen Research Programme. Noruega. En línea. [Consultado 12 junio 2005]. Disponible en < <http://www.gexcon.com/index.php?src=handbook/GEXHBcontents.htm>>
- Bowen, J.C., Fletcher, E.R., Richmond, D.R.; (1968). *Estimate of man's tolerance to the direct effects of airblast*. Lovelace Foundation for Medical Education and Research. DASA-2113. Alburquerque, New Mexico (Citado por TNO,1989).

- Carol, S.; (2002). *Estudio del accidente ocurrido en Toulouse el 21 de Septiembre de 2002*. Asociación para la prevención de Accidentes (APA) No. 159. 8-17.
- Casal, J.; Montiel, H.; Planas, E.; Vílchez, J. A. (1999). *Análisis del riesgo en instalaciones industriales*. Ediciones UPC, Barcelona.
- Chen-Shan Kao; Kwan-Hua Hu; (2002). *Acrylic reactor runaway and explosion accident analysis*. Journal of Loss Prevention of the Process Industries 15 (2002) 213-222.
- Clemedson C.J., Jönsson, A.; (1976). *Effects of the frequency content in a complex air shockwaves on lung injuries in rabbits*. Aviation, Space and Environmental Medicine: 1143-1152. (Citado por TNO,1989).
- Code de l'environnement. Article L515-16, inséré par Loi n° 2003-699 du 30 juillet 2003 art. 5. Journal Officiel du 31 juillet 2003. Francia.
- Comisión Europea, JRC. (2000). *Base de Datos MARS 4.1*. Major Accident Hazard Bureau, Ispra (Italia).
- Conrath, E., Krauthammer, T., Marchand, K.A., and Mlakar, P.F. (1999). *Structural Design for Physical Security*, ASCE. Reston, VA, EE.UU.
- Consejo de Europa (2005). *Accord EUR-OPA. Accord partiel ouvert en matière de prévention, de protection et d'organisation des secours contre les risques naturels et technologiques majeurs*. Estrasburgo. En línea. [Consultado 18 enero 2006]. Disponible en < http://www.coe.int/t/dg4/majorhazards/default_FR.asp>
- Contini, S., Francocci, G.F.; (1993a). *Rassegna di modelli per la valutazione degli effetti delle esplosioni negli impianti industriali*. Centro Comune di Ricerca, Ispra, Italia. ISEI/IE 2397/93.
- Contini, S., Francocci, G.F.; (1993b). *Criteri e modelli di vulnerabilità*. Centro Comune di Ricerca, Ispra, Italia. ISEI/IE 2398/93.
- Coon, N.; Ma, S.; Redington, P.K.; Brown, B.; Eyring, H.; (1980). *A theory of distortion of the reaction zone*. Proc. Natl. Acad. Sci. USA. Vol. 77, No 10, pp. 5575-5579.
- Couet, T.; (2001). *L'explosion de l'usine AZF de Toulouse. 21.9.2001*. Resumen del informe de la Inspección General del Medio Ambiente (24.10.01). Francia. En línea. [Consultado 21 de julio 2005]. Disponible en < <http://pedagogie.ac-toulouse.fr/histgeo/monog/azf/azf.htm>>

Dechy, N.; Nouilleau, Y.; (2004). *Damages of the Toulouse Disaster, 21st September 2001*. Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries. 11th International Symposium Loss Prevention 2004 Praha Congress Centre 31 May-3 June 2004.

Díaz Alonso, F.; González Ferradás, E.; Sánchez Pérez, J.F.; (2006). *ZEUS. Zonas de Planificación para Explosiones Industriales*. Grupo de Investigación de Seguridad e Higiene en la Industria. Universidad de Murcia.

Directiva 94/9/CE (ATEX) del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a los aparatos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas. Diario Oficial de las Comunidades Europeas n° L 100 de 19/04/1994 pp. 1 –29.

Directiva 94/55/CE del Consejo, de 21 de noviembre de 1994, sobre la aproximación de las legislaciones de los Estados Miembros con respecto al transporte de materias peligrosas por carretera. Diario Oficial de las Comunidades Europeas n° L 319 de 12/12/1994 pp. 7 – 13.

Directiva 96/82/CE del Consejo, de 9 de Diciembre de 1996, relativa al control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas (SEVESO II). Diario Oficial de las Comunidades Europeas n° L 010 de 14/01/1997 pp. 13 – 33.

Directiva 2003/105/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de Diciembre de 2003, por la que se modifica la Directiva 96/82/CE del Consejo, relativa al control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas. Diario Oficial de las Comunidades Europeas n° L 345 de 31/12/2003 pp. 97 – 105.

Drittes Gesetz zur Änderung des Sprengstoffgesetzes und anderer Vorschriften. BGBl. I Nr. 34 vom 20.06.2005 S. 1626. Alemania.

Eggen, J.B.M.M.; (1998). *GAME: Development of Guidance for the Application of the multi-energy method*. TNO Prins Maurits Laboratory, Rijswijk, Holanda.

Finney, D.L.; (1971). *PROBIT analysis*, Cambridge University Press, Londres.

Fitzgerald,G. (2001). *A Comparison of Simple Vapor Cloud Explosion Prediction Methodologies*, Second Annual Symposium, Mary Kay O'Connor Process Safety Center. San Antonio, Texas.

Galbraith, K.; (1998). *Blast injury data and models*. HSE (Health & Safety Executive), Londres.

Garrison, W.G.; (1988). *One hundred largest losses-A Thirty-year review of property damage losses in the hydrocarbon-chemical industries*. M&M Protection Consultant, Chicago. (Citado por Bjerketvedt, Roar Bakke y van Wingerden, 1992).

González Ferradás, E., Ruiz Boada, F.J., Miñana Aznar, A., Navarro Gómez, J., Ruiz Gimeno, J., Martínez Alonso, J.; (2002). *Zonas de planificación para accidentes graves de tipo térmico*. Dpto. de Ingeniería Química de la Universidad de Murcia, Dirección General de Protección Civil. Ministerio del Interior.

Hauptmanns, U.; (2001a). *A procedure for analyzing the flight of missiles from explosions of cylindrical vessels*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 14 (2001) 395-402.

Hauptmanns, U.; (2001b). *A Monte-Carlo based procedure for treating the flight of missiles from tank explosions*. Probabilistic Engineering Mechanics 16 (2001) 307-312.

Hawrelak, D.; (1999). *The Tragedy of San Juanico, PEMEX, Mexico City, 19 Nov 84*. En línea. [Consultado 20 de Marzo de 2006]. Disponible en <http://instruct.uwo.ca/engin-sc/cbe317/ES317y/LectureNo3/3.0_BLEVE_Case_Study/3.1_PEMEX_Slides.ppt>.

Health and Safety Executive (1998). *Planning case assessment guide. Chapter 3A: Solid/Liquid Explosions*. Internal Hazardous Installations Directorate (HID). HSE, Londres.

Hirsch, F.G.; (1968). *Effects of overpressure on the ear- a review*. Annals of the New York Academy of Sciences 152 (Art. 1). Nueva York.

Hoiset, S.; Hjertager, B.H.; Solberg, T.; Malo, K.A.; (2000). *Flixborough revisited- an explosion simulation approach*. ELSEVIER. Journal of Hazardous Materials, 1-9.

I. Chem. E (Institution of Chemical Engineers); (1994), *Explosions in the Process Industries*, Major Hazards Monograph IChemE. Londres.

INERIS (2004). *Les éclatements de réservoirs. Phénoménologie et modélisation des effets*. Ministère de l'Écologie et du Développement durable, Francia.

- En línea. [Consultado 12 enero 2006]. Disponible en <www.ineris.fr/index.php?module=doc&action=getFile&id=2386>.
- Jenkins, M. et al.; (1980). *Explosive Power of Pyrotechnic Compositions*. 19th Explosives Safety Seminar pp. 77 y sig., California.
- Kerle, N., Stekelenburg, R.; (2004). *Advanced Structural Disaster Damage Assessment based on Aerial Oblique Video Imagery and Integrated Auxiliary Data Sources*. Commission VII. TS-PS: WG VII/5. XXth ISPRS Congress. En línea. [Consultado 24 marzo 2005]. Disponible en <www.isprs.org/istanbul2004/comm7/papers/115.pdf>
- Kersten, R.J.A. y Mak, W.A.; (2004). *Explosion hazards of ammonium nitrate, How to assess the risks?* International Symposium on Safety Manufacture, Storage, Use, Transport and Disposal of Hazardous Materials. Tokyo, 10-12 Marzo 2004. En línea. [Consultado 21 marzo 2005]. Disponible en <www.tno.nl/defensie_en_veiligheid/documenten/Article_IWS_Kersten.pdf>
- Kinsella, K.G.; (1993). *A rapid assessment methodology for the prediction of vapour cloud explosion overpressure*. Proceedings of the International Conference and Exhibition on Safety, Health and Loss Prevention in the Oil, Chemical and Process Industries, Singapur.
- Kirk, Raymond Eller; Othmer, Frederick (2001). *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. 4^a Edición. John Wiley & Sons, Inc. Nueva Jersey.
- Kopyt, N. Kh., Struchaev, A.I.; Krasnoshchokov, Yu. I.; Rogov, N.K.; Shamshov, K.N.; (1989). *Fizika Goriyenya i Vzryva*, 25: 21-28. (Citado por IchemE, 1994).
- Lees, F.P.; (1996). *Loss prevention in the process industries, second edition*. Butterworth-Heinemann. Londres.
- López Jimeno, C.; López Jimeno, E.; (1994). *Manual de perforación y voladura de rocas*. Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid.
- Medard, Louis A.; (1989), *Accidental Explosion. Volume 1: physical and chemical properties*. Ellis Horwood Limited, Londres.
- Mercx, W.P.M., Johnson, D.M., Puttock, J.; (1995). *Validation of Scaling Techniques for Experimental Vapour Cloud Explosion Investigations*. Process Safety Progress, 4, No 2, 120-130.

Mercx, W.P.M., van den Berg, A.C., van Leeuwen, D.; (1998). *Application of correlations to quantify the source strength of vapour cloud explosions in realistic situations. Final report for the project: GAMES*. TNO Prins Maurits Laboratory, Rijswijk, Holanda.

Ministère de l'Écologie et du Développement durable (2005). *BLEVE dans un depot de GPL en raffinerie. Le 4 janvier 1966. Feyzin (69) - France*. Base de Datos ARIA/BARPI. Ministerio francés de Medio Ambiente. En línea. [Consultado 24 diciembre 2005]. Disponible en <http://aria.ecologie.gouv.fr/barpi_2405.jsp>

Mohanty, B.;(1998), *Physics of Explosion Hazards, Forensic Investigation of Explosions*, 15-44.

Mouilleau, Y., Lechaudel, J.F.; (1999). *Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre*. INERIS. DRA-YMO/YMO- 1999- 20433. Francia.

ONU, Organización de Naciones Unidas; (2001), *ADR , Acuerdo Europeo sobre el transporte internacional de mercancías peligrosas por carretera*. En línea. [Consultado 28 septiembre 2004]. Disponible en <http://www.euskadi.net/adr/porindintro2001_c.htm>.

Pintgen, F.; Austin, J.M.; Shepherd, J.E.; (2002). *Detonation front structure: variety and characterization*. Graduate Aeronautical Laboratories, California Institute of Technology, Pasadena, California. En línea. [Consultado 14 marzo 2004]. Disponible en <<http://www.galcit.caltech.edu/EDL/publications/reprints/iccdpap.pdf>>

Planas, G.; (1989). *La prevención de incendios y explosiones en las instalaciones industriales*. Ingeniería Química, 141-155.

Planas-Cuchi, E.; Gasulla, N.; Ventosa, A.; Casal, J.; (2004). *Explosion of a road tanker containing liquified natural gas*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 17 (2004) 315-322.

Planning (Hazardous Substances) Act 1990. Chapter10. HMSO (Her Majesty's Statutory Office). Reino Unido. En línea. [Consultado 7 octubre 2005]. Disponible en http://www.opsi.gov.uk/acts/acts1990/Ukpga_19900010_en_1.htm>.

Presidenza del Consiglio dei Ministri. Dipartimento della Protezione Civile (2004). *Linee Guida: Pianificazione dell'emergenza esterna degli stabilimenti industriali a rischio d'incidente rilevante*. Italia. En línea. [Consultado 4 noviembre 2005]. Disponible en <www.governo.it/GovernoInforma/Dossier/protezione_civile/linee.pdf>

Proust, Ch.:(1996), *Dust Explosions in Pipes: a Review*, ELSEVIER. J.Loss Prev.Process Ind., 9, No 4, 267-277.

Prugh, R.W.:(1999). *The Effects of Explosive Blast on Structures and Personnel*, Process Safety Progress, 18, No. 1, 5-16.

Real Decreto 400/1996, de 1 de marzo, por el que se dictan las disposiciones de aplicación de la Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo 94/9/CE, relativa a los aparatos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas. BOE de 8 de abril de 1996.

Real Decreto 1254/1999 de 16 de julio, por el que se aprueban medidas de control de los riesgos inherentes a los accidente graves en los que intervengan sustancias peligrosas. BOE de 20 de julio de 1999.

Real Decreto 681/2003, de 12 de junio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo. BOE de 18 de junio de 2003.

Real Decreto 1196/2003, de 19 de septiembre, por el que se aprueba la Directriz Básica de protección civil para el control y planificación ante el riesgo de accidentes graves en los que intervienen sustancias peligrosas. BOE de 9 de octubre de 2003.

Real Decreto 119/2005, de 4 de febrero, por el que se modifica el Real Decreto 1254/1999, de 16 de julio, por el que se aprueban medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas. BOE de 11 de febrero de 2005.

Real Decreto 948/2005, de 29 de Julio, por el que se modifica el Real Decreto 1254/1999, de 16 de julio, por el que se aprueban medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas. BOE de 30 de julio de 2005.

Riley, Nigel (2004). *Standardised Risk Analysis Working Group. The United Kingdom Approach*. Health and Safety Executive. Londres.

Sadee, C.; Samuels, D.E.; O'Brien, T.P. ; (1976). *The Characteristics of the Explosion of Cyclohexane at the Nypro (UK) Flixborough Plants on 1st June 1974*. Journal of Occupational Accidents, 1 (1976/1977) 203-235.

Santamaría, J. M.; Herguido, J.; Menéndez, M. A.; Monzón, A.; (1999). *Ingeniería de Reactores*. Editorial Síntesis, Madrid.

Santamaría, J. M.; Braña, A. P.; (1998). *Análisis y reducción de riesgos en la Industria Química*. 2ª edición. Fundación Mapfre, Madrid.

Schultz, E.; Wintenberger, J.; Shepherd, J.; (1999). *Investigation of Deflagration to Detonation Transition for application to pulse detonation engine ignition systems*. California Institute of Technology, Pasadena, USA. 16th JANNAF Propulsion Meeting 1999.

SFK y TAA. (2005). *Leitfaden Empfehlungen für Abstände zwischen Betriebsbereichen nach der Störfall-Verordnung und schutzbedürftigen Gebieten im Rahmen der Bauleitplanung, Umsetzung § 50 BImSchG - Bundes-Immissionsschutzgesetz-*. Alemania. En línea. [Consultado 28 octubre 2005]. Disponible en http://www.sfk-taa.de/berichte_reports/berichte_sfk/sfk_taa_gs_1.pdf.

Stull, D.R.; (1976). *Fundamentals of fire and explosion*. American Institute of Chemical Engineers and The Dow Chemical Company, Michigan.

The Control of Major Accident Hazards Regulations 1999. Statutory Instrument No. 743. SI 1999/743. HMSO (Her Majesty's Statutory Office). Londres. En línea. [Consultado 30 noviembre 2005]. Disponible en <http://www.opsi.gov.uk/si/si1999/19990743.htm>.

TNO; (1989). *Methods for the determination of possible damage*, - The green book- CPR 16E. CIP- data of the Royal Library. The Hague, (Holanda).

TNO; (1997). *Methods for the calculation of physical effects (The Yellow book), Chapter 5; Vapour cloud explosions*. W.P.M: Mercx y A.C. van den Berg. The Hague, (Holanda).

Tratado por el que se establece una Constitución para Europa (2004). Diario Oficial de la Unión Europea de 16 de Diciembre de 2004, 2004/C 310/01. En línea. [Consulta 2 Abril 2006] Disponible en: <http://europa.eu.int/eur-lex/lex/JOhtml.do?uri=OJ:C:2004:310:SOM:ES:HTML>.

GUIAR (2006). *Grupo de Investigación de Riesgos en la Industria de la Universidad de Zaragoza*. En línea. [Consulta 30 abril 2006]. Disponible en www.unizar.es

U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board -CSB-; (1999). *Investigation Report Propane tank explosion*. Report No. 98-007-I-IA. EE.UU. En línea. [Consultado 20 marzo 2005]. Disponible en

<http://www.csb.gov/metatraffic2/track.asp?mtr=http://www.csb.gov/completed_investigations/docs/Final%20Herrig.pdf>.

Van den Berg, A.C., y Lannoy, A.; (1993). *Methods for vapour cloud explosions blast modelling*. Journal of Hazardous Materials, vol 34, 151-171. (Citado por TNO, 1997).

Van den Berg, A.C.; van Wingerden, C.J.M. y Opschoor, G; (1989). *Vapour Cloud Explosion Blast Prediction*. Plant/Operation Progress, Vol. 8, No. 4. pp. 234-238.

Van Wingerden, K.; Bjerketvedt, D. y Roar Bakke, J; (1999). *Detonations in pipes and in the open*. Christian Michelsen Research Institute. Bergen, Noruega. Petro Chemical Congress'99, 23-24 Junio 1999.

Venart, J.E.S.; Rutledge, G.A.; Sumanthipala, K.; Sollows, K.;(1993), *To BLEVE or Not To BLEVE: Anatomy of a Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion*, Process Safety Progress, 12, No. 2, 67-70.

Vogl, A.:(1995), *The Course of Dust Explosions in Pipes of Pneumatic Systems*, La Rivista dei Combustibili, 49, No. 10, 381-393.

Voogd, Henk.; (2004). *Disaster Prevention in Urban Environments*. European Journal of Spatial Development n° 12, septiembre 2004.

Wang, Y.; Wang, Z.; Wang, C.; Hu B.; (2000). *Energy estimation on ethylene sphere explosion*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 13 (2000) 393-396.

White C.S., Jones R.K., Damon E.G.; (1971). *The biodynamics of airblast*. Lovelace Foundation for Medical Education and Research. Albuquerque, New Mexico. DNA 2738T. (Citado por TNO,1989).

Zweite Verordnung zum Sprengstoffgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 10. September 2002. BGBl. I Nr. 65 vom 13.09.2002 S. 3543. Alemania.

NOMENCLATURA

A_1 :	Parámetro utilizado en la ecuación 4.2.
A_2 :	Parámetro utilizado en la ecuación 4.2.
A_3 :	Parámetro utilizado en la ecuación 4.3.
A_4 :	Parámetro utilizado en la ecuación 4.3.
A_i :	Área superficial de cada uno de los objetos de la zona obstruida, m^2 .
$A_{casquete}$:	Área superficial del casquete esférico en contacto con la nube, m^2 .
$A_{cilindro}$:	Área superficial de los depósitos cilíndricos, m^2 .
A_D :	Área perpendicular al avance del fragmento, m^2 .
$A_{fragmento}$:	Área superficial del fragmento, m^2 .
A_{ke} :	Fracción de energía liberada que se transforma en energía cinética de los fragmentos, adimensional.
A_{sb} :	Parámetro de la ecuación I.40, que tiene en cuenta la posible reflexión de la onda contra el suelo.
C :	Constante para la determinación de la profundidad de penetración de un fragmento en una superficie, m^3/kg .
C_1 :	Parámetro utilizado en la ecuación 4.5.
C_2 :	Parámetro utilizado en la ecuación 4.5.
C_3 :	Parámetro utilizado en la ecuación 4.6.
C_4 :	Parámetro utilizado en la ecuación 4.6.
C_D :	Coefficiente de arrastre, adimensional.
$C_D A_D$:	Factor de rozamiento, m^2 .
C_p :	Calor específico a presión constante, $J/kg \cdot K$
C_v :	Calor específico a volumen constante, $J/kg \cdot K$
D :	Diámetro promedio de obstáculos, m.
D_{arm} :	Diámetro promedio aritmético, m.
D_{ham} :	Diámetro promedio armónico, m.
D_{hym} :	Diámetro promedio hidráulico, m.
D_i :	Diámetro de cada uno de los objetos de la zona obstruida considerados cilíndricos, m.
E_c :	Energía cinética transferida a los fragmentos, J.
E_{av} :	Energía liberada por el gas en la expansión producida por la rotura de un recipiente, J.
E_{exp} :	Energía liberada en la explosión, J.
$E_{exp gr}$:	Energía liberada en la explosión de la parte obstruida de la nube, J.
$E_{exp 0}$:	Energía liberada en la explosión de la parte no obstruida de la nube, J.
F :	Factor de corrección para recipientes cilíndricos o cercanos al suelo en el método de Baker.
H :	Entalpía, J.
J :	Profundidad de penetración de un fragmento, m.
K :	Parámetro utilizado en la ecuación 4.7 para los tramos de

	ecuación característica en los que la sobrepresión es constante, Pa.
L_i :	Longitud de cada uno de los objetos de la zona obstruida considerados cilíndricos, m.
LIE :	Límite inferior de explosividad, mg/m^3 .
LII :	Límite inferior de inflamabilidad, mg/m^3 .
LSE :	Límite superior de explosividad, mg/m^3 .
LSI :	Límite superior de inflamabilidad, mg/m^3 .
L_P :	Distancia recorrida por la llama, m.
L_V :	Longitud del recipiente cilíndrico, m.
$M_{carcasa}$:	Masa de la carcasa o cuerpo central del recipiente, kg.
M_{cohete} :	Masa del recipiente sin una de las tapas, en forma de cohete, kg.
M_f :	Masa del fragmento, kg.
M_{total} :	Masa total de fluido en un recipiente, kg.
M_{tapa} :	Masa de las tapas (extremos semiesféricos) de un recipiente cilíndrico, kg.
M_{tira} :	Masa de cada uno de los fragmentos alargados procedentes de la rotura frágil de la carcasa, kg.
M_V :	Masa del recipiente, kg.
M_W :	Número de Mach, adimensional.
N :	Nivel de la explosión para el método de Multienergía.
P :	Presión, Pa.
P_{ef} :	Presión efectiva que actúa sobre la caja torácica del individuo, Pa.
P_i :	Sobrepresión alcanzada en el seno de la nube, bar.
P_{max} :	Sobrepresión máxima alcanzada por la onda de presión, Pa.
P_r :	Presión reflejada, Pa.
P_s :	Sobrepresión estática, Pa.
P_0 :	Presión atmosférica, Pa.
P' :	Sobrepresión estática escalada, adimensional.
P'_1 :	Sobrepresión escalada adimensional utilizada en el cálculo del alcance de los fragmentos.
P'_{mod} :	Sobrepresión estática escalada obtenida de la aplicación inversa de los coeficientes de corrección del método de Baker, adimensional.
P'_{s0} :	Sobrepresión estática escalada inicial tras el estallido de un recipiente, adimensional.
Q :	Sobrepresión dinámica, Pa.
Q' :	Sobrepresión dinámica escalada, adimensional.
R :	Constante universal de los gases, $8.314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ó $0.082 \text{ atm}\cdot\text{l}/(\text{mol}\cdot\text{K})$
R_{cil} :	Radio del cilindro utilizado para determinar la altura media de la nube en la zona obstruida, m.
R_{esf} :	Radio de la esfera cuyo casquete se utiliza para modelizar la nube explosiva, m.

R_f :	Alcance de los fragmentos, m.
R_i :	Radio del objeto considerado, m.
R_{0}^{gr} :	Radio de la nube situada en zona obstruida, m.
R_0^0 :	Radio de la nube situada en zona no obstruida, m.
R' :	Distancia escalada, adimensional.
R'_f :	Alcance de los fragmentos escalado, adimensional.
R'_0 :	Distancia escalada correspondiente al radio del recipiente o de la nube considerados semiesféricos, adimensional.
S :	Parámetro que tiene en cuenta la influencia de la sobrepresión y del impulso en una determinada ecuación Probit, adimensional.
S_C :	Factor de escala, m.
S_f :	Superficie del fragmento
S_L :	Velocidad de combustión laminar de la mezcla combustible-aire, m / s.
T :	Temperatura absoluta, K.
T_a :	Temperatura absoluta del aire ambiente, K.
T_g :	Temperatura absoluta del gas comprimido, K.
T_i :	Temperatura del sistema en el momento inmediatamente anterior al estallido del recipiente, K
T_2 :	Temperatura del sistema en el momento inmediatamente posterior al estallido del recipiente, K.
U :	Velocidad de desplazamiento de la onda de presión, m/s.
U_r :	Velocidad de desplazamiento de la onda reflejada, m/s.
V_c :	Volumen total de la nube explosiva, m ³ .
$V_{casquete}$:	Volumen de un casquete esférico, m ³
$V_{cilindro}$:	Volumen de un cilindro, m ³
$V_{con,min}$:	Volumen de la mínima caja que contenga a la zona obstruida, m ³ .
V_g :	Volumen de gas en el interior del recipiente, m ³ .
V_{gr} :	Volumen total de la nube en zona obstruida, m ³ .
$V_{caja i}$:	Volumen de cada una de las cajas del método Multienergía, m ³ .
$V_{nube i}^*$:	Volumen de nube en el interior de cada caja, m ³ .
V_{obs} :	Volumen ocupado por obstáculos en el total de la zona obstruida, m ³ .
$V_{obj i}$:	Volumen ocupado por obstáculos en el interior de la caja i, m ³ .
V_0 :	Volumen total de la nube en zona no obstruida, m ³ .
VBR :	Relación de volumen obstruido, adimensional.
W_c :	Masa de sustancia gaseosa combustible que interviene en la explosión, kg.
$W_{congested}$:	Masa de gas natural en concentración estequiométrica con el aire y contenida en una región congestionada para el método British Gas VCE, kg.
W_{exp} :	Masa de sustancia explosiva implicada en la explosión, kg.
W_{TNT} :	Masa equivalente de TNT, kg.

$\left(\frac{W_{TNT}}{W_{exp}}\right)_{explosivo}$:	Masa de TNT equivalente por unidad de masa de explosivo, adimensional.
$\left(\frac{W_{TNT}}{W_{exp}}\right)_{explosivo, Ps}$:	Masa de TNT equivalente por unidad de masa de explosivo para el cálculo de la sobrepresión, adimensional.
$\left(\frac{W_{TNT}}{W_{exp}}\right)_{explosivo, i}$:	Masa de TNT equivalente por unidad de masa de explosivo para el cálculo del impulso, adimensional.
X :		Razón de vapor, adimensional.
X_a :		Razón de vapor para la situación 2a, adimensional
X_b :		Razón de vapor para la situación 2b, adimensional
X_S :		Fracción molar estequiométrica del combustible en aire, adimensional.
Y :		Probit, adimensional.
ZA :		Zona de Alerta, m.
ZI :		Zona de Intervención, m.
ZI_{edf} :		Zona de Intervención para zonas con edificios, m.
$ZI_{sin edf}$:		Zona de Intervención para zonas sin edificios, m.
a :		Parámetro empleado en la ecuación 3.14.
a_i :		Longitud de cada caja, m.
b :		Parámetro empleado en la ecuación 3.14.
b_i :		Anchura de cada caja, m.
c_{casq} :		Altura del casquete semiesférico que representa la nube explosiva, m.
c_i :		Altura de cada caja, m.
c_0 :		Velocidad del sonido en el aire ambiente, m/s.
c_1 :		Velocidad del sonido en el gas comprimido, m/s.
d_V :		Diámetro del recipiente cilíndrico, m.
dt :		Diferencial de tiempo, s.
ef :		Espesor del fragmento, m.
g :		Aceleración de la gravedad, 9.8 m/s^2 .
h :		Entalpía específica, J/kg.
h_1 :		Entalpía específica a la presión p_1 , J/kg.
h_{1liq} :		Entalpía específica de la fase líquida a la presión p_1 , J/kg.
h_{1vap} :		Entalpía específica de la fase vapor a la presión p_1 , J/kg.
h_2 :		Entalpía específica a presión atmosférica, J/kg.
h_{2liq} :		Entalpía específica de la fase líquida a presión atmosférica, J/kg.
h_{2vap} :		Entalpía específica de la fase vapor a presión atmosférica, J/kg.
h_i :		Altura del cilindro de volumen igual al de la nube explosiva, correspondiente con la altura media de la nube, m.
h_{max} :		Altura de la isopleta más elevada que pasa por la zona obstruida, m.
h_{min} :		Altura de la isopleta menos elevada que pasa por la zona

	obstruida, m.
i :	Impulso mecánico de la onda de presión, Pa·s.
i_{esc} :	Impulso escalado en la expresión del Probit para muerte por hemorragia de pulmón, $\text{Pa}^{1/2} \cdot \text{s}/\text{kg}^{1/3}$.
i_{TNT} :	Impulso escalado para el método TNT equivalente, $\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{kg}^{1/3}$.
i' :	Impulso escalado para los métodos Multienergía y Baker, adimensional.
$i'_{\text{corregido}}$:	Impulso escalado tras la aplicación de los coeficientes de corrección del método de Baker, adimensional.
k_1 :	Constante utilizada en la ecuación I.2.
k_2 :	Constante utilizada en la ecuación I.2.
l_1 :	Parámetro utilizado para el cálculo de la altura media de la nube explosiva, m.
l_2 :	Parámetro utilizado para el cálculo de la altura media de la nube explosiva, m.
m :	Masa corporal del individuo afectado por la onda de presión, kg.
m_{exp} :	Masa de hidrocarburo que está comprendida entre los límites de inflamabilidad, kg.
m_{1liq} :	Masa de líquido antes del estallido del recipiente, kg.
m_{2liq} :	Masa de líquido después del estallido del recipiente, kg.
m_{1vap} :	Masa de vapor antes del estallido del recipiente, kg.
m_{2vap} :	Masa de vapor después del estallido del recipiente, kg.
n :	Número de moles.
n_{HC} :	Número de moles de la sustancia combustible.
n_{O_2} :	Número de moles de oxígeno.
n_{N_2} :	Número de moles de nitrógeno.
n_f :	Número de fragmentos producidos en una explosión de recipiente.
p :	Presión absoluta a la que se encuentra el fluido, Pa.
p_1 :	Presión absoluta del gas comprimido en el interior del recipiente en el momento inmediatamente anterior al estallido, Pa.
r_{casq} :	Radio del casquete semiesférico que representa la nube explosiva, m.
r_i :	Distancia a la que se alcanza el umbral de impulso, m.
r_p :	Distancia a la que se alcanza el umbral de sobrepresión, m.
r_{ZA} :	Distancia correspondiente a Zona de Alerta, m.
r_{ZI} :	Distancia correspondiente a Zona de Intervención, m.
$r_{ZA(i)}$:	Distancia correspondiente a Zona de Alerta a partir del umbral de impulso (40 Pa·s), m.
$r_{ZA(P)}$:	Distancia correspondiente a Zona de Alerta a partir del umbral de sobrepresión (1300 Pa), m.
$r_{ZI(i)edf}$:	Distancia correspondiente a Zona de Intervención para zonas con edificios calculada a partir del umbral de impulso (110 Pa·s), m.

$r_{ZI(P)edf}$:	Distancia correspondiente a Zona de Intervención para zonas con edificios a partir del umbral de sobrepresión (6000 Pa), m.
$r_{ZI sin edf}$:	Distancia correspondiente a Zona de Intervención para zonas sin edificaciones, m.
s :	Entropía específica, J/(kg·K)
s_{1liq} :	Entropía específica de la fase líquida correspondiente al estado inicial, J/(kg·K).
s_{1vap} :	Entropía específica de la fase vapor correspondiente al estado inicial, J/(kg·K).
s_2 :	Entropía específica correspondiente al estado final, J/(kg·K).
s_{2liq} :	Entropía específica de la fase líquida correspondiente al estado final, J/(kg·K).
s_{2vap} :	Entropía específica de la fase vapor correspondiente al estado final, J/(kg·K).
t :	Tiempo, s.
t_p :	Duración de la fase positiva de la onda de presión, s.
t'_p :	Duración de la fase positiva escalada, adimensional.
u :	Energía interna específica, J/kg.
u_1 :	Energía interna del estado inicial, antes del estallido, J/kg.
u_{1liq} :	Energía interna de la fase líquida en el estado inicial, J/kg.
u_{1vap} :	Energía interna de la fase vapor en el estado inicial, J/kg.
u_2 :	Energía interna del estado expandido tras el estallido, J/kg.
u_{2a} :	Energía interna de la situación 2a en el estado expandido, J/kg.
u_{2b} :	Energía interna de la situación 2b en el estado expandido, J/kg.
v :	Volumen específico del fluido, m ³ /kg.
v_1 :	Volumen específico del fluido antes del estallido del recipiente, m ³ /kg.
v_{1liq} :	Volumen específico de la fracción líquida antes del estallido, m ³ /kg.
v_{1vap} :	Volumen específico de la fracción vapor antes del estallido, m ³ /kg.
v_{2liq} :	Volumen específico de la fracción líquida después del estallido, m ³ /kg.
v_{2vap} :	Volumen específico de la fracción vapor después del estallido, m ³ /kg.
v_i :	Velocidad inicial de los fragmentos, m/s.
v'_i :	Velocidad inicial escalada de los fragmentos, adimensional.
z :	Distancia al origen de la explosión, m.
z_0 :	Radio del recipiente considerado semiesférico, m.
z' :	Distancia escalada para el método TNT equivalente, m/kg ^{1/3} .
Δ :	Incremento.
ΔH_c :	Entalpía de combustión de la sustancia gaseosa combustible, J/kg.
ΔH_{exp} :	Entalpía de la reacción de explosión, J/kg.
ΔT :	Incremento de temperatura, K.

Σ :	Sumatorio.
ΣA_i :	Suma del área superficial de todos los objetos de la zona obstruida, m ² .
Φ :	Parámetro adimensional que caracteriza la velocidad de liberación de energía en el estallido de recipientes.
α :	Factor de eficiencia del método de TNT equivalente, adimensional.
α^* :	Ángulo para determinar la elevación de un recipiente, grados.
α_I :	Ángulo de incidencia de la onda contra un obstáculo, grados.
α_{exp} :	Factor utilizado en la ecuación 4.1.
α_{TNT} :	Factor utilizado en la ecuación 4.4.
α_{Multi} :	Factor utilizado en la ecuación 4.8.
α_{Bak} :	Factor utilizado en la ecuación 4.9.
β_{exp} :	Factor utilizado en la ecuación 4.1.
δ :	Magnitud que provoca el daño en la ecuación PROBIT.
γ_a :	Coefficiente de expansión adiabática o razón entre los calores específicos del aire, adimensional.
γ_I :	Coefficiente de expansión adiabática o razón entre los calores específicos del gas comprimido (constante de Poisson), adimensional.
λ :	Tamaño de celda en el frente de detonación, mm.
ρ :	Densidad, kg/m ³
ρ_f :	Densidad del fragmento, kg/m ³ .
ρ_S :	Densidad del aire a la presión máxima de la onda, kg/m ³ .
ρ_0 :	Densidad del aire ambiente, kg/m ³ .
σ_P :	Desviación típica de la distribución en la ecuación IV.1.
μ :	Masa molecular de la sustancia inflamable, kg/kmol.
μ_a :	Masa molecular del aire ambiente, kg/kmol.
μ_P :	Media de la distribución en la ecuación IV.1.
μ_I :	Masa molecular del gas comprimido, kg/kmol.

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1. Distribución de incendios y explosiones en industrias que utilizan o procesan hidrocarburos entre 1957 y 1986 (Garrison, 1988).	12
TABLA 2.2. Incendios y explosiones en industrias de proceso. Los datos proceden de una muestra de 83 accidentes ocurridos en un periodo de 5 años. (Lees, 1996).	12
TABLA 2.3. Causas de las explosiones en industrias de transformación de hidrocarburos (Planas, 1989).	13
TABLA 2.4. Algunos accidentes de explosiones de nubes de vapor que resume una lista mayor (113 accidentes) publicada por Lees (1996) y Contini (1993).	13
TABLA 2.5. Accidentes relevantes ocurridos con intervención de nitrato amónico. (Carol, 2002).	13
TABLA 2.6. Algunas explosiones industriales provocadas por explosivos o municiones (Lees, 1996), añadiendo la explosión de Enschede (2000).	14
TABLA 2.7. Sistemas en los que puede ocurrir la transición rápida de fase.	35
TABLA 3.1. Ecuaciones PROBIT para muerte por daño al pulmón por ondas de presión.	47
TABLA 3.2. Principales ecuaciones PROBIT para los efectos que se citan	51
TABLA 3.3. Efectos de la sobrepresión y del impulso en edificios con paramentos de ladrillo (Wilton (1970), Gabrielsen (1973), Glasstone (1957), citados por Lees (1996)).	53
TABLA 3.4. Niveles de daños estructurales en edificaciones debidos a explosiones y ecuaciones PROBIT más utilizadas (TNO, 1989)	54
TABLA 3.5. Valores de C de la ecuación 3.22 para varios materiales -Lees (1996)-	56
TABLA 3.6. Impulso y energía cinética de los fragmentos formados en varios supuestos accidentales calculados mediante los modelos citados.	60
TABLA 4.1. Parámetros de las ecuaciones de sobrepresión e impulso escalado para el método del TNT equivalente	64
TABLA 4.2. Características para el método TNT equivalente	65

TABLA 4.3. Parámetros de ajuste de las ecuaciones de sobrepresión escalada para el método de Multienergía.....	68
TABLA 4.4. Parámetros de ajuste de las ecuaciones de impulso escalado para el método de Multienergía	69
TABLA 4.5. Valores de K para la ecuación 4.7.....	70
TABLA 4.6. Valores de α_{Mult} y de β_{exp} para la ecuación 4.8.....	70
TABLA 4.7. Parámetros de ajuste de las ecuaciones de sobrepresión e impulso escalados para recipientes esféricos.....	73
TABLA 4.8. Parámetros de ajuste de las características para recipientes esféricos.....	73
TABLA 4.9. Parámetros de ajuste de las ecuaciones de sobrepresión e impulso escalados para recipientes cilíndricos	73
TABLA 4.10. Parámetros de ajuste de las características para recipientes cilíndricos.....	74
TABLA 4.11. Análisis de consecuencias de la explosión del ejemplo del apartado 4.4 a diferentes distancias.....	96
TABLA 5.1. Valores umbral propuestos en la Directriz Básica (2003) para las Zonas de Intervención y Alerta	98
TABLA 5.2. Ecuaciones de las curvas de impulso para cada uno de los métodos	108
TABLA 5.3. Procedimiento de obtención de la masa de TNT equivalente que proporciona la misma distancia de Intervención con edificios, tanto a partir del umbral de sobrepresión de 6000 Pa como del impulso de 110 Pa·s	108
TABLA 5.4. Procedimiento de obtención de la energía de la explosión (método Multienergía -curvas 6 a 10-) que proporciona la misma distancia de Intervención con edificios, tanto a partir del umbral de sobrepresión de 6000 Pa como del impulso de 110 Pa·s	109
TABLA 5.5. Procedimiento de obtención de la E_{exp} (método Baker para recipientes esféricos) que proporciona la misma distancia de Intervención con edificios, tanto a partir del umbral de sobrepresión de 6000 Pa como del impulso de 110 Pa·s.....	109

TABLA 5.6. Criterios de elección del umbral que define cada Zona de Planificación.....	110
TABLA 5.7. Cálculo de la distancias de las Zonas de Planificación cuando se utiliza el método del TNT equivalente	112
TABLA 5.8. Cálculo de la distancias de las Zonas de Planificación cuando se utiliza el método de Multienergía.....	116
TABLA 5.9. Factores de corrección de los umbrales escalados de P' e i' para recipientes cercanos al suelo.	119
TABLA 5.10. Factores de corrección de los umbrales escalados de P' e i' para recipientes cilíndricos.....	119
TABLA 5.11. Cálculo de la distancia de Alerta cuando se utiliza el método de Baker para el estallido de recipientes.....	122
TABLA 5.12. Cálculo de la distancia de Intervención cuando se utiliza el método de Baker para el estallido de recipientes.....	123
TABLA 6.1. Comparación de las Zonas de Planificación de esta propuesta con las de los principales países de la UE.....	128
TABLA 8.1. Datos de entrada para la explosión de Flixborough (1974) utilizando todos los programas informáticos evaluados	179
TABLA 8.2. Datos de entrada para la explosión de Wesseling (1985) utilizando todos los programas informáticos evaluados	182
TABLA 8.3. Datos de entrada correspondientes al estallido de un recipiente que contiene nitrógeno gas.....	185
TABLA 8.4. Datos de entrada correspondientes al estallido de un recipiente que contiene una mezcla líquido-vapor de amoníaco	186
TABLA I.1. Clasificación de los métodos de cálculo de las explosiones de nube de vapor	197
TABLA I.2. Velocidad del frente de llama en número de Mach, que es el parámetro de la figura I.1, para fuentes de ignición de baja intensidad.....	199
TABLA I.3. Valores propuestos para la eficiencia de la explosión (α) para nubes de vapor (Casal et al., 1999).	205
TABLA I.4. Valores de la eficiencia de explosión para nubes de diferentes sustancias según IChemE (1994)	206

TABLA I.5. Masa de TNT por unidad de masa de diferentes explosivos o sustancias inestables para el cálculo de la sobrepresión o del impulso	207
TABLA I.6. Criterios para seleccionar el nivel de la explosión más idóneo, parámetro de las figuras I.5 a I.7, según Kinsella (1993)	214
TABLA I.7. Sobrepresión inicial de la explosión que se utiliza para determinar el nivel (de 1 a 10) en la figura I.5.....	215
TABLA I.8. Velocidad de combustión laminar de diferentes combustibles gaseosos en proporciones estequiométricas con el aire (Mouilleau y Lechaudel, 1999).....	217
TABLA I.9. Valores de la presión de rotura para el método de Baker	227
TABLA I.10. Factores de ajuste para determinar la sobrepresión escalada (P') y el impulso escalado (i') para recipientes cilíndricos.....	240
TABLA I.11. Factores de ajuste para determinar la sobrepresión escalada (P') y el impulso escalado (i') para recipientes cercanos al suelo con ángulos inferiores a 15° (ver etapa 3).....	240
TABLA I.12. Estimación del número de fragmentos	244
TABLA I.13. Estimación de la masa y forma de los fragmentos	244
TABLA I.14. Selección de la figura a utilizar en función de la geometría del recipiente, el tipo de estallido y los parámetros característicos	246
TABLA I.15. Factor de rozamiento C_{DA_D} para diferentes tipos de fragmentos (TNO, 1997).....	260
TABLA II.1. Resumen del cálculo del volumen total de la nube obstruida	273
TABLA II.2. Datos de partida para la aplicación del método de Baker con gas ideal.....	280
TABLA II.3. Datos de partida para el ejemplo de aplicación directa del método de Baker para un recipiente con gas no ideal.....	288
TABLA II.4. Alcance de los fragmentos que pueden formarse en la rotura de la caldera considerada	294
TABLA III.1. Zonas de planificación de accidentes provocados por la detonación de sustancias explosivas y calculados con el método de TNT equivalente.....	320

TABLA III.2. Zonas de Planificación de accidentes provocados por la explosión de nubes de vapor calculados con el método Multienergía.....	321
TABLA III.3. Zonas de Planificación de accidentes provocados por la explosión de nubes de vapor calculados con el método TNT equivalente	322
TABLA III.4. Zonas de Planificación con los valores límite de sobrepresión o impulso para el accidente 5 (método de Baker).....	323
TABLA III.5. Zonas de Planificación con los valores límite de sobrepresión o impulso para el accidente 9 (método TNT equivalente).....	323
TABLA III.6. Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos para el accidente Doe Run, 1962 (apartado III.2.1).....	325
TABLA III.7. Alcance de los fragmentos para el accidente Doe Run, 1962 (apartado III.2.1).	325
TABLA III.8. Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos para el accidente Feyzin, 1966 (apartado III.2.2).	326
TABLA III.9. Alcance de los fragmentos para el accidente Feyzin, 1966 (apartado III.2.2).	326
TABLA III.10. Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos para accidentes recopilados por Baker (1977) (apartado III.2.3).	327
TABLA III.11. Alcance de los fragmentos para accidentes recopilados por Baker (1977) (apartado III.2.3).	327
TABLA III.12. Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos para accidentes recopilados por Baker, 1977 (apartado III.2.4).	328
TABLA III.13. Alcance de los fragmentos para accidentes recopilados por Baker, 1977 (apartado III.2.4).....	328
TABLA III.14. Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos para el accidente Camping Los Alfaques, 1978 (apartado III.2.5).....	329
TABLA III.15. Alcance de los fragmentos para el accidente Camping Los Alfaques, 1978 (apartado III.2.5).....	329
TABLA III.16. Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos para el accidente San Juan Ixhuatepec, 1984 (apartado III.2.6).	330

TABLA III.17. Alcance de los fragmentos para el accidente San Juan Ixhuatepec, 1984 (apartado III.2.6).....	330
TABLA III.16. Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos para el accidente Grangemouth, 1987 (apartado III.2.7).....	331
TABLA III.17. Alcance de los fragmentos para el accidente Grangemouth 1987 (apartado III.2.7).	331
TABLA III.18. Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos para el accidente 5 (apartado III.2.8).	332
TABLA III.19. Alcance de los fragmentos y Zonas de Planificación para el accidente 5 (apartado III.2.8).	332
TABLA III.20. Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos para el accidente 9 (apartado III.2.9).	333
TABLA III.21. Alcance de los fragmentos y Zonas de Planificación para el accidente 9 (apartado III.2.9).	333
TABLA IV.1. Relación de los valores PROBIT y los porcentajes de población o edificios afectados (TNO, 1989).....	337

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1. Evolución de la sobrepresión con el tiempo para explosiones detonantes (A) y deflagrantes (B).	15
FIGURA 2.2. Simplificación esquemática de la onda de presión detonante (A) y deflagrante (B).	16
FIGURA 2.3. Reflexión de una onda de presión en el choque perpendicular contra un obstáculo (Stull, D.R., 1976).	17
FIGURA 2.4. Secuencia de formación del punto triple y del frente Mach en la reflexión de la onda de presión contra el suelo (Mohanty, B., 1998).	18
FIGURA 2.5. Esquema simplificado del proceso de detonación de un explosivo	24
FIGURA 2.6. Perfil de temperatura en la llama laminar.	26
FIGURA 2.7. Mecanismo de retroalimentación de la deflagración (TNO, 1997).	27
FIGURA 2.8. Relación de la velocidad del frente de llama y la sobrepresión ...	27
FIGURA 2.9. Esquema de la detonación de una nube de vapor	28
FIGURA 2.10. Perfil presión-tiempo en el que se muestra el periodo de inducción tras el cual se produce la reacción.	29
FIGURA 2.11. Estructura del frente de detonación	30
FIGURA 2.12. Transición de la deflagración a la detonación	32
FIGURA 2.13. Tipos de roturas de recipientes esféricos	39
FIGURA 2.14. Tipos de roturas de recipientes cilíndricos	40
FIGURA 3.1. Porcentajes de rotura timpánica frente a la sobrepresión producida en explosiones (Hirsch, 1968).	43
FIGURA 3.2. Porcentajes de rotura del tímpano en función de la sobrepresión de la onda explosiva, según la ecuación 3.2 y la tabla IV.1 (anexo IV).	44
FIGURA 3.3. Cuerpo humano en posición tendida, que ofrece la mínima resistencia a la onda	45

FIGURA 3.4. Cuerpo humano de pie, que ofrece la máxima resistencia a la onda	45
FIGURA 3.5. Cuerpo humano de pie o tendido, junto a una estructura que provoque la reflexión de la onda.....	45
FIGURA 3.6. Líneas de isorriesgo (%) para hemorragia pulmonar provocada por explosiones, obtenidas mediante la ecuación 3.9 y la tabla IV.1 (anexo IV).	48
FIGURA 3.7. Líneas de isorriesgo (%) para muerte por desplazamiento e impacto con el cráneo o con el cuerpo, obtenidas a partir de las ecuaciones 3.12 y 3.14, respectivamente	50
FIGURA 3.8. Líneas de isorriesgo para distintos niveles de daño sobre edificios de cuatro plantas	55
FIGURA 3.9. Fragmento de un recipiente que destruye una vivienda en la explosión de San Juan Ixhuatepec en 1984 (Hawrelak, 1999).	57
FIGURA 3.10. Daños producidos en una nave (A) por el impacto del fragmento de la figura 3.11 en Albert City (Iowa) en 1998 (CSB, 1999).	57
FIGURA 3.11. Fragmento de un recipiente que destruye la nave de la figura 3.10 en una granja en Albert City (Iowa) en 1998 (CSB, 1999).	58
FFIGURA 3.12. Fragmento de un tanque de GLP que destruye un almacén en una explosión en Monmouth (Illinois) en 2005 (Anderson, 2005).....	58
FIGURA 4.1. Significado gráfico de la “característica” de una explosión.....	63
FIGURA 4.2. Característica de la explosión de Toulouse (en 2001) obtenida con el método de TNT equivalente	66
FIGURA 4.3. Característica de la explosión de Flixborough (en 1974), obtenida con el método de Multienergía.....	71
FIGURA 4.4. Característica de la explosión de Beijing (en 1997), obtenida con el método de Baker.....	75
FIGURA 4.5. “Características” de la detonación de diferentes masas de explosivos utilizando el modelo del TNT equivalente	78
FIGURA 4.6. “Características” de la explosión de nubes con diferentes energías para el nivel de explosión 1, utilizando el modelo de Multienergía	79

FIGURA 4.7. “Características” de la explosión de nubes con diferentes energías para el nivel de explosión 2, utilizando el modelo de Multienergía	80
FIGURA 4.8. “Características” de la explosión de nubes con diferentes energías para el nivel de explosión 3, utilizando el modelo de Multienergía	81
FIGURA 4.9. “Características” de la explosión de nubes con diferentes energías para el nivel de explosión 4, utilizando el modelo de Multienergía	82
FIGURA 4.10. “Características” de la explosión de nubes con diferentes energías para el nivel de explosión 5, utilizando el modelo de Multienergía	83
FIGURA 4.11. “Características” de la explosión de nubes con diferentes energías para los niveles de explosión 6, utilizando el modelo de Multienergía	84
FIGURA 4.12. “Características” de la explosión de nubes con diferentes energías para los niveles de explosión 7, utilizando el modelo de Multienergía	85
FIGURA 4.13. “Características” de la explosión de nubes con diferentes energías para los niveles de explosión 8, utilizando el modelo de Multienergía	86
FIGURA 4.14. “Características” de la explosión de nubes con diferentes energías para los niveles de explosión 9, utilizando el modelo de Multienergía	87
FIGURA 4.15. “Características” de la explosión de nubes con diferentes energías para los niveles de explosión 10, utilizando el modelo de Multienergía	88
FIGURA 4.16. “Características” del estallido de recipientes esféricos con diferentes energías utilizando el modelo de Baker	89
FIGURA 4.17. “Características” del estallido de recipientes cilíndricos con diferentes energías utilizando el modelo de Baker	90
FIGURA 4.18. Daños más importantes provocados por la incidencia directa de las ondas sobre los seres humanos	91

FIGURA 4.19. Daños más importantes provocados por las ondas de presión sobre las edificaciones.....	92
FIGURA 4.20. Análisis de consecuencias de la explosión descrita en el apartado 4.4 sobre los seres humanos en el exterior de edificios, determinadas por los puntos de corte de la “característica” de la explosión y las líneas de isorriesgo.....	94
FIGURA 4.21. Análisis de consecuencias de la explosión descrita en el apartado 4.4 sobre edificios, determinadas por los puntos de corte de la “característica” de la explosión y las líneas de isorriesgo.	95
FIGURA 5.1. Representación conjunta de los valores límite de sobrepresión e impulso establecidos en la Directriz Básica (2003), de las líneas de isorriesgo más significativas para humanos y de la “característica” de la explosión de máximo nivel.....	99
FIGURA 5.2. Representación conjunta de los valores límite de sobrepresión e impulso establecidos en la Directriz Básica (2003), de las líneas de isorriesgo más significativas para edificaciones y de la “característica” de la explosión de máximo nivel.....	100
FIGURA 5.3. Representación de la Zonas de Planificación mediante los valores límite propuestos.	104
FIGURA 5.4. Valores límite actuales [Directriz Básica (2003)] y propuestos para establecer las Zonas de Planificación.	105
FIGURA 5.5. Posibilidades de corte de varias características de explosiones (A, B, C y D) y las líneas de isorriesgo.....	106
FIGURA 5.6. Impulso escalado frente a distancia escalada para el método Multienergía	115
FIGURA 5.7. Diagrama del proceso iterativo propuesto para establecer los factores de corrección para los umbrales de impulso.....	118
FIGURA 5.8. Posibilidades que pueden plantearse al comparar el alcance máximo de los fragmentos formados en la explosión de un contenedor (R_f) y las distancias de Intervención y Alerta calculadas a partir de los valores límite de sobrepresión o impulso.....	120
FIGURA 5.9. Diagrama del procedimiento de cálculo de las Zonas de Planificación para el estallido de recipientes	121
FIGURA 7.1. Pantalla de inicio de ZEUS®.....	135

FIGURA 7.2. Pantalla de trabajo (En este caso se trata de la que corresponde a la explosión de una nube de vapor -método Multienergía-)	136
FIGURA 7.3. Pantalla de base de datos de sustancias (En este caso corresponde a la pestaña Propiedades constantes del método de Baker)...	140
FIGURA 7.4. Pantalla para introducir en la base de datos las propiedades de una nueva sustancia (en este caso corresponde al método Multienergía).....	141
FIGURA 7.5. Pantalla de Ayuda.....	142
FIGURA 7.6. Pantalla de contacto con el Grupo de Investigación de Seguridad e Higiene en la Industria de la Universidad de Murcia.	143
FIGURA 7.7. Pantalla de datos de entrada para el método del TNT equivalente	144
FIGURA 7.8. Pantalla de introducción de una nueva sustancia para el método del TNT equivalente.....	146
FIGURA 7.9. Pantalla de gráficas y Zonas de Planificación	147
FIGURA 7.10. Ampliar zona	148
FIGURA 7.11. Volver al estado original	148
FIGURA 7.12. Pantalla de consecuencias de la detonación de sustancias inestables, explosivas o pirotécnicas.....	149
FIGURA 7.13. Pantalla de tabla de resultados numéricos distancia-sobrepresión-impulso para la detonación de sustancias inestables, explosivas o pirotécnicas	150
FIGURA 7.14. Pantalla de datos de entrada para el método Multienergía (explosión de nubes de vapor)	151
FIGURA 7.15. Pantalla de introducción de una nueva sustancia para el método Multienergía	154
FIGURA 7.16. Pantalla de gráficas y Zonas de Planificación	155
FIGURA 7.17. Ampliar zona	156
FIGURA 7.18. Volver al estado original.....	156

FIGURA 7.19. Pantalla de consecuencias de la explosión de nubes de vapor.....	157
FIGURA 7.20. Pantalla de tabla de resultados numéricos distancia-sobrepresión-impulso para las explosiones de nubes de vapor.....	158
FIGURA 7.21. Pantalla de datos de entrada para los métodos Baker (estallido de recipientes) y TNO (alcance de fragmentos).....	159
FIGURA 7.22. Representación de la sobrepresión o del impulso frente a la distancia para el método de Baker	162
FIGURA 7.23. Pantalla de introducción de una nueva sustancia para el método de Baker	163
FIGURA 7.24. Representación genérica de la entalpía específica de la fase líquida frente a la presión.....	164
FIGURA 7.25. Introducción de ocho puntos de una curva genérica de la entalpía específica de la fase líquida frente a la presión, que ZEUS asocia a una sucesión de segmentos.....	165
FIGURA 7.26. Pantalla de Entalpía del líquido saturado	165
FIGURA 7.27. Ampliar zona	166
FIGURA 7.28. Volver al estado original.....	166
FIGURA 7.29. Pantalla de gráficas y Zonas de Planificación (la Zona de Intervención sin edificios viene determinada por el alcance de los fragmentos, al superar a la distancia a la que se produce el 1% de rotura timpánica)	168
FIGURA 7.30. Pantalla de gráficas y Zonas de Planificación (no se establece Zona de Alerta al superar el alcance de los fragmentos al 10% de daño estructural menor)	169
FIGURA 7.31. Pantalla de consecuencias del estallido de recipientes.....	170
FIGURA 7.32. Pantalla de tabla de resultados numéricos distancia-sobrepresión-impulso para los estallidos de recipiente.....	171
FIGURA 7.33. Pantalla inicial del informe de salida.....	172
FIGURA 8.1. Sobrepresión e impulso proporcionados por los diferentes programas para la explosión de Flixborough.....	180

FIGURA 8.2. Desviación porcentual de los valores de sobrepresión de cada programa con respecto al valor medio a cada distancia.....	180
FIGURA 8.3. Desviación porcentual de los valores de impulso de cada programa con respecto al valor medio a cada distancia.....	181
FIGURA 8.4. Sobrepresión e impulso proporcionados por los diferentes programas para la explosión de Wesseling	183
FIGURA 8.5. Desviación porcentual de los valores de sobrepresión de cada programa con respecto al valor medio a cada distancia.....	183
FIGURA 8.6. Desviación porcentual de los valores de impulso de cada programa con respecto al valor medio a cada distancia.....	184
FIGURA 8.7. Sobrepresión e impulso proporcionados por los TRACE y ZEUS para el estallido de un recipiente que contiene nitrógeno gas.....	185
FIGURA 8.8. Sobrepresión e impulso proporcionados por los TRACE y ZEUS para el estallido de un recipiente que contiene una mezcla líquido-vapor de amoníaco.....	187
FIGURA I.1. Presión escalada frente a la distancia escalada para diferentes velocidades del frente de llama, expresadas en números de Mach (M_w), según el modelo de Baker-Strehlow (Baker et al., 1996).	198
FIGURA I.2. Sobrepresión de la onda en función de la distancia escalada para el método del TNT equivalente (IChemE, 1994).....	203
FIGURA I.3. Impulso escalado en función de la distancia escalada para el método del TNT equivalente (IChemE, 1994).....	203
FIGURA I.4. Secuencia del método del TNT equivalente.....	204
FIGURA I.5. Sobrepresión estática escalada (P') frente a distancia escalada (R') de la onda formada en la explosión de nubes para el método de Multienergía	211
FIGURA I.6. Sobrepresión dinámica escalada (Q') frente a la distancia escalada (R') de la onda formada en la explosión de nubes para el método de Multienergía	212
FIGURA I.7. Duración escalada de la fase positiva (t'_p) frente a la distancia escalada (R') de la onda formada en la explosión de nubes para el método de Multienergía	213

FIGURA I.8. Esquemas de 2 cubos de 3 x 3 x 3 m ³ constituidos por 2 tipos de cilindros de dimensiones diferentes usados en los ensayos en los que se basa la guía GAME.....	215
FIGURA I.9. Secuencia de aplicación del método Multienergía.....	219
FIGURA I.10. Secuencia de aplicación del método de Baker.....	226
FIGURA I.11. Evolución isoentrópica de un sistema líquido-vapor desde la situación 1 a la 2 (esta última a presión atmosférica), como consecuencia del estallido de un recipiente.	229
FIGURA I.12. Criterio para diferenciar recipientes elevados y no elevados. Si α^* es superior/inferior a 15° el recipiente se considera que está elevado/sobre el suelo.	231
FIGURA I.13. Sobrepresión escalada (P') frente a distancia escalada (R') para el estallido de recipientes (Baker et al. 1977).	233
FIGURA I.14. Secuencia de aplicación del método de Baker refinado, para recipientes con gas ideal y $R' < 2$	234
FIGURA I.15. Relación de las velocidades del sonido en el gas y en el aire ambiente frente a la relación de la presión de rotura y la atmosférica (p_1/P_0) para diferentes valores de la sobrepresión escalada inicial P'_{s0} y $\gamma_I=1.4$ (Baker et al. 1977).	236
FIGURA I.16. Relación de las velocidades del sonido en el gas y en el aire ambiente frente a la relación de la presión de rotura y la atmosférica (p_1/P_0) para diferentes valores de la sobrepresión escalada inicial P'_{s0} y $\gamma_I=1.66$ (Baker et al. 1977).	237
FIGURA I.17. Sobrepresión escalada (P') frente a distancia escalada (R')	238
FIGURA I.18. Impulso escalado (i') frente a la distancia escalada (R') para el estallido de recipientes (Baker et al. 1977).	239
FIGURA I.19. Metodología para la determinación del alcance de fragmentos.....	243
FIGURA I.20. Velocidad de los fragmentos con relación a la del sonido en función de la presión escalada (adimensional) para recipientes esféricos con gas ideal (nf: número de fragmentos).	247
FIGURA I.21a. Velocidad de los fragmentos con relación a la del sonido en función de la presión escalada (adimensional) para recipientes esféricos cuya rotura se produzca como consecuencia de una reacción	

fuera de control o de una explosión interna, para recipientes esféricos cuya rotura se produzca como consecuencia de una reacción fuera de control o de una explosión interna, para $\gamma_1 = 1.7$ y distintos valores de Φ (I.49).....	248
FIGURA I.21b. Velocidad de los fragmentos con relación a la del sonido en función de la presión escalada (adimensional) para recipientes esféricos cuya rotura se produzca como consecuencia de una reacción fuera de control o de una explosión interna, para $\gamma_1 = 1.4$ y distintos valores de Φ (I.49).....	249
FIGURA I.21c. Velocidad de los fragmentos con relación a la del sonido en función de la presión escalada (adimensional) para recipientes esféricos cuya rotura se produzca como consecuencia de una reacción fuera de control o de una explosión interna, para $\gamma_1 = 1.1$ y distintos valores de Φ (I.49).....	250
FIGURA I.22. Velocidad de los fragmentos con relación a la del sonido en función de la presión escalada (adimensional) para cilindros con gas ideal y una relación longitud / diámetro (L_V / d_V) de 5 (nf: número de fragmentos).	251
FIGURA I.23. Velocidad de los fragmentos con relación a la del sonido en función de la presión escalada (adimensional) para cilindros con gas ideal y una relación longitud / diámetro (L_V / d_V) de 10 (nf: número de fragmentos).....	252
FIGURA I.24a. Velocidad de los fragmentos con relación a la del sonido en función de la presión escalada (adimensional) para recipientes cilíndricos con una relación longitud / diámetro (L_V / d_V) de 5 y cuya rotura se produzca como consecuencia de una reacción fuera de control o de una explosión interna, para $\gamma_1 = 1.7$ y distintos valores de Φ (I.49).....	253
FIGURA I.24b. Velocidad de los fragmentos con relación a la del sonido en función de la presión escalada (adimensional) para recipientes cilíndricos con una relación longitud / diámetro (L_V / d_V) de 5 y cuya rotura se produzca como consecuencia de una reacción fuera de control o de una explosión interna, para $\gamma_1 = 1.4$ y distintos valores de Φ (I.49). .	254
FIGURA I.24c Velocidad de los fragmentos con relación a la del sonido en función de la presión escalada (adimensional) para recipientes cilíndricos con una relación longitud / diámetro (L_V / d_V) de 5 y cuya rotura se produzca como consecuencia de una reacción fuera de control o de una explosión interna, para $\gamma_1 = 1.1$ y distintos valores de Φ (I.49).....	255

FIGURA I.25a. Velocidad de los fragmentos con relación a la del sonido en función de la presión escalada (adimensional) para recipientes cilíndricos con una relación longitud / diámetro (L_V / d_V) de 10 y cuya rotura se produzca como consecuencia de una reacción fuera de control o de una explosión interna, para $\gamma_1 = 1.7$ y distintos valores de Φ (I.49).....	256
FIGURA I.25b. Velocidad de los fragmentos con relación a la del sonido en función de la presión escalada (adimensional) para recipientes cilíndricos con una relación longitud / diámetro (L_V / d_V) de 10 y cuya rotura se produzca como consecuencia de una reacción fuera de control o de una explosión interna, para $\gamma_1 = 1.4$ y distintos valores de Φ (I.49).....	257
FIGURA I.25c. Velocidad de los fragmentos con relación a la del sonido en función de la presión escalada (adimensional) para recipientes cilíndricos con una relación longitud / diámetro (L_V / d_V) de 10 y cuya rotura se produzca como consecuencia de una reacción fuera de control o de una explosión interna, para $\gamma_1 = 1.1$ y distintos valores de Φ (I.49).....	258
FIGURA I.26. Alcance escalado de los fragmentos frente a velocidad escalada inicial	261
FIGURA II.1. Planta de almacenamiento de GLP	266
FIGURA II.2. Isopletas correspondientes al LII de la nube de propano a diferentes alturas	267
FIGURA II.3. Modelización de la parte obstruida de la nube como un casquete semiesférico de volumen igual al de un cilindro.....	267
FIGURA II.4. Variables para el cálculo de la altura media del casquete a partir de una esfera de radio R_{esf}	268
FIGURA II.5. Cálculo generalizado de la altura media de la nube en la zona obstruida.....	269
FIGURA II.6. Cajas seleccionadas para el cálculo de la nube obstruida. Se indican sus dimensiones en metros.	272
FIGURA II.7. Esferas de las cajas 2 y 3, elevadas 1.50 m sobre el suelo e inmersas en la nube de 3 metros de altura	273
FIGURA II.8. Centros de la explosión, situados en los centros geométricos aproximados de la nube obstruida y de la nube libre.....	275