



Explosión de Equipos a Presión.

Análisis de Riesgos y Consecuencias



Autor:
Saturnino Galán Fontenla



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA**
BARCELONATECH

Facultat de Nàutica de Barcelona



1 ÍNDICE

	Página
1 ÍNDICE	4
2 MEMORIA	11
2.1 Objeto.....	13
2.2 Alcance	13
2.3 Antecedentes.....	14
2.3.1 Riegos y peligros	14
2.3.1.1 Evaluación del riesgo	15
2.3.2 Teoría del fuego.....	17
2.3.2.1 Incendios.....	17
2.3.2.2 Fuentes de ignición.....	17
2.3.2.3 Triángulo del fuego.....	18
2.3.2.4 Tetraedro del fuego.....	18
2.3.2.5 Relación comburente combustible.....	19
2.3.2.6 Relación combustible energía.....	19
2.3.2.7 Temperatura de flash	19
2.3.2.8 Temperatura de encendido	19
2.3.2.9 Temperatura de autoencendido.....	20
2.3.2.10 Igniciones espontaneas	20
2.3.2.11 Límites de explosividad.....	20
2.3.2.12 Mecanismos de transmisión del calor	20
2.3.3 Clases de fuego.....	21
2.3.4 Casos especiales de fuego	21
2.3.4.1 Boilover.....	22
2.3.4.2 Incendio de líquidos.....	23
2.3.4.3 Incendio de gases	24
2.3.5 Explosiones	26
2.3.5.1 Introducción	26
2.3.5.2 Origen de las explosiones	27
2.3.5.3 Tipos de explosiones.....	27
2.3.5.3.1 Deflagrantes	28
2.3.5.3.2 Detonantes	29
2.3.5.4 Casos especiales de explosiones.....	29
2.3.5.4.1 Explosiones en espacios cerrados, Atmosferas inflamables.....	29
2.3.5.4.2 Explosiones en espacios abiertos	30
2.3.6 Explosión de recipientes.....	30

2.3.6.1	Tipos de roturas de los recipientes a presión:	32
2.3.6.2	El origen de las explosiones de los recipientes	33
2.3.6.2.1	Explosiones de origen físico	33
2.3.6.2.2	Explosiones de origen químico	33
2.3.7	BLEVE	34
2.3.7.1	Causas que originan el BLEVE	34
2.3.7.1.1	Sobrecalentamiento	35
2.3.7.1.2	Despresurización súbita	35
2.3.7.1.3	Nucleación espontánea	35
2.3.7.1.4	Transmisión rápida de fase	36
2.3.8	La onda de presión	38
2.3.9	Efectos de la onda de presión	44
2.3.9.1	Consecuencias de los accidentes	45
2.3.9.2	Daños sobre las personas	46
2.3.9.2.1	Gravedad de las lesiones	46
2.3.9.2.2	Tipos de lesiones por onda expansiva	48
2.3.9.2.3	Tipos de daños sobre las personas	48
2.3.9.3	Respuesta de las estructuras	53
2.3.9.3.1	Nivel de Daño	53
2.3.9.4	Sobrepresión impulso y fragmentos proyectados	58
2.3.10	Métodos de cálculo	59
2.3.10.1	Método del TNT equivalente	60
2.3.10.2	Método de Multienergía	62
2.3.10.3	Método de Baker	62
2.4	Análisis de soluciones	63
2.4.1	Reducción del riesgo	63
2.4.2	Medidas preventivas	64
2.4.2.1	Aliviaderos de explosión	64
2.4.2.2	Sistemas de alivio y venteo	65
2.4.2.3	Otras precauciones	65
2.4.2.4	Protección de recintos	65
2.4.2.5	Prevención por distancia	68
2.5	Requisitos de cálculo	70
2.5.1	Centros de recarga de equipos de respiración autónomos	70
2.5.2	Ejemplo de Explosión para un recipiente de respiración autónomo	78
2.5.2.1	Datos de partida	78
2.5.2.2	Características del recipiente	78
2.5.2.3	Condiciones de partida	78

2.6	Evaluación de los resultados	79
2.6.1	Evaluación del resultado del cálculo mediante el Método del TNT equivalente	79
2.6.1.1	Evaluación de la sobrepresión e impulso mediante el Método del TNT equivalente	79
2.6.1.2	Alcance para el valor umbral de la zona de intervención	80
2.6.2	Alcance para el valor umbral de la zona de alerta.....	80
2.6.3	Evaluación del resultado del cálculo mediante el Método Baker	81
2.6.3.1	Evaluación de la sobrepresión e impulso mediante el método Baker.....	81
2.6.3.2	Evaluación de los resultados, consecuencias	82
2.6.3.3	Alcance para el valor umbral de la zona de intervención	82
2.6.4	Alcance para el valor umbral de la zona de alerta.....	83
2.6.5	Evaluación de los resultados para la proyección de fragmentos.....	83
2.7	Conclusiones.....	84
2.8	Normas y Referencias.....	85
2.8.1	Normativa nacional	85
2.8.1.1	Equipos y recipientes a presión	85
2.8.1.2	Prevención de riesgos laborales	86
2.8.1.3	Accidentes graves	87
2.8.1.4	Accidentes mayores.....	87
2.8.1.5	Sustancias peligrosas	87
2.8.1.6	Almacenamiento de productos químicos.....	88
2.8.1.7	Instalaciones de gases combustibles	88
2.8.1.8	Instalaciones petrolíferas	88
2.8.1.9	Reglamento de explosivos	88
2.8.2	Normativa Europea.....	88
2.8.2.1	Códigos de referencia	89
2.8.3	NORMAS	92
2.8.4	Bibliografía.....	92
2.8.5	Páginas web.....	93
2.8.6	Programas de cálculo.....	93
2.9	Abreviaturas y unidades	94
2.9.1	Abreviaturas	94
2.9.2	Unidades.....	95
3	ANÉXOS.....	97
3.1	Índice de anexos	97
4	ANEXO I MÉTODO DEL TNT EQUIVALENTE	98
4.1	Introducción	98
4.2	Secuencia de aplicación del método	98

4.2.1	Determinación de la masa de TNT equivalente.....	98
4.2.2	Determinación de la energía liberada en la explosión	99
4.2.3	Determinación de la energía liberada en la explosión para nubes de vapor	99
4.2.4	Determinación de la energía liberada en el estallido de recipientes	99
4.2.5	Determinación de la energía liberada para un sistema no ideal (vapor o líquido-vapor)	100
4.2.6	Determinación de la eficiencia de la explosión	101
4.2.7	Eficiencia de la explosión para sustancias explosivas.....	101
4.2.8	Eficiencia de la explosión para nubes de vapor	101
4.2.9	Eficiencia de la explosión para estallido de recipientes	102
4.2.10	Cálculo de la sobrepresión e impulso en las distancias de interés	102
4.2.11	Calculo de la duración de la fase positiva de la onda de choque	105
4.3	Evaluación de los resultados	106
4.3.1	Respuesta de las estructuras antes los efectos de la onda de choque.....	106
5	ANEXO II MÉTODO MULTIENERGÍA	107
5.1	Introducción	107
5.2	Secuencia de aplicación del método multienergía	107
5.2.1	Determinación del radio de la nube	108
5.2.2	Determinación del valor de sobrepresión	108
5.2.3	Determinación del valor de la energía liberada en la explosión	108
5.2.4	Determinación del valor de la sobrepresión	108
5.2.5	Determinación de la duración de la fase positiva.....	108
5.3	Evaluación de los resultados	109
6	ANEXO III MÉTODO BAKER.....	111
6.1	Introducción	111
6.2	Secuencia de aplicación del cálculo.....	112
6.2.1	Determinar los datos de partida.....	112
6.2.2	Determinar la energía liberada en la explosión.....	113
6.2.2.1	Determinación de la energía liberada para un gas ideal	113
6.2.2.2	Determinación de la energía liberada para un sistema (vapor o líquido-vapor).....	114
6.2.2.3	Determinación de la energía efectiva de la onda de presión, para sustancias energéticas	114
6.2.3	Determinación de la energía efectiva de la onda de presión, E_{exp}	115
6.2.4	A Cálculo de la sobrepresión y del impulso a determinadas distancias del origen	116
6.2.4.1	Cálculo de la distancia normalizada o escalada	116
6.2.4.2	Determinación de la sobrepresión normalizada.....	116
6.2.4.2.1	Sobrepresión en caso de ($dn < 2$)	116
6.2.4.2.2	Sobrepresión para distancias próximas al origen de la explosión	118

6.2.4.2.2.1	Cálculo relación de la velocidad del sonido en el gas comprimido y el aire	118
6.2.4.2.2.2	Cálculo de la distancia inicial	118
6.2.4.2.2.3	Cálculo de la sobrepresión escalada	119
6.2.4.2.2.4	Selección del nivel de la explosión.....	120
6.2.4.2.2.5	Determinación de la sobre presión escalada P`	121
6.2.4.3	Determinación del impulso escalado	121
6.2.4.4	Ajuste de la sobrepresión escalada y del impulso escalado	122
6.2.4.5	Cálculo de la sobrepresión estática y del impulso	122
6.2.4.6	Comprobación del valor de la sobrepresión estática	123
6.2.5	B Cálculo de la distancia a la que se produce una determinada sobrepresión o impulso	123
6.2.5.1	Distancias escaladas de las Zonas de Planificación.....	124
6.2.5.2	Distancias de las Zonas de Planificación	124
7	ANEXO IV CÁLCULO DE LA PROYECCIÓN DE FRAGMENTOS	125
7.1	Introducción	125
7.2	Clasificación de los fragmentos	125
7.3	Método de cálculo para estimar el alcance de los fragmentos.....	126
7.3.1	Estimación del número y masa de los fragmentos.....	126
7.3.2	Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos	127
7.3.2.1	Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos	128
7.3.2.2	Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos (BAUM).....	133
7.3.2.3	Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos (MOORE)	133
7.3.2.4	Elección de la velocidad inicial adecuada	134
7.3.3	Determinación del alcance de los fragmentos	134
7.3.4	Daños producidos por el impacto de fragmentos sobre estructuras	136
7.3.5	El impulso mecánico de los fragmentos	136
8	ANEXO V EJEMPLO DE CÁLCULO MEDIANTE EL MÉTODO DEL TNT EQUIVALENTE, APLICÁNDOLO AL ESTALLIDO DE UN RECIPIENTE A PRESIÓN DEBIDO A FALLOS DE MATERIAL.....	138
8.1	Energía liberada en la explosión de un gas considerado este como gas ideal	138
8.2	Eficiencia de la explosión y masa de TNT equivalente	138
8.3	Determinación del cálculo de la sobrepresión e impulso a determinadas distancias.....	139
8.4	Alcance para el valor umbral de la zona de intervención.....	140
8.5	Alcance para el valor umbral de la zona de alerta.....	140
9	ANEXO VI EJEMPLO DE CÁLCULO MEDIANTE EL MÉTODO BAKER, APLICÁNDOLO AL ESTALLIDO DE UN RECIPIENTE A PRESIÓN DEBIDO A FALLOS DE MATERIAL	141
9.1	Determinación de la energía liberada en la explosión	141
9.1.1	Determinación de la energía efectiva de la onda de presión E _{exp}	141

9.1.2	Cálculo de la sobrepresión y del impulso a determinadas distancias del origen	141
9.1.2.1	Cálculo de sobrepresión para distancias próximas al origen.....	142
9.1.2.2	Cálculo de la relación de la velocidad del sonido con el gas comprimido y el aire	142
9.1.2.3	Cálculo de la distancia inicial	143
9.1.2.4	Calculo de la sobrepresión escalada inicial P_{s0}	143
9.1.2.5	Localización del punto de partida.....	144
9.1.3	Cálculo del impulso escalado.....	145
9.1.4	Ajuste la presión y el impulso escalados	145
9.1.5	Cálculo de la sobrepresión estática y del impulso	146
9.1.6	Evaluación de los resultados	147
9.1.7	Alcance para el valor umbral de la zona de intervención.....	148
9.1.8	Alcance para el valor umbral de la zona de alerta.....	148
10	ANEXO VII EJEMPLO DE CÁLCULO DE LA PROYECCIÓN DE FRAGMENTOS.....	149
10.1.1	Características del recipiente	149
10.1.2	Estimación del número de los fragmentos	149
10.1.3	Estimación de la masa de los fragmentos	149
10.1.4	Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos	149
10.1.5	Calculo de la sobrepresión escalada adimensional	150
10.1.6	Comprobación de la velocidad inicial obtenida.....	151
10.1.7	Calculo del alcance máximo.....	152

EXPLOSIÓN DE EQUIPOS A PRESIÓN. ANÁLISIS DE RIESGOS Y CONSECUENCIAS

MEMORIA



Facultat de Nàutica de Barcelona

FECHA: **JUNIO 2012**

AUTOR: **D. Saturnino Galán Fontenla**

2 MEMORIA

La mayor parte de las sustancias y líquidos que se manipulan y procesan en la industria en general y en las industrias de procesos se almacenan en tanques y recipientes.

Las explosiones accidentales han ocurrido y siguen ocurriendo durante las operaciones de proceso de las plantas químicas y petroquímicas, la limpieza de los tanques de combustible de buques tanque, el almacenamiento de productos, y en general en cualquier ámbito de la industria.

En la tabla siguiente, se muestran diferentes equipos e instalaciones, así como su ámbito reglamentario de aplicación, en los que existe riesgo de explosión.

Tipo de instalación o equipo	Ámbito industrial	Reglamentación aplicable
Tanques de almacenamiento de productos petrolíferos	Refinerías de petróleo y parques de almacenamiento de líquidos petrolíferos	ITC MI IP 01
Depósitos de combustible enterrados	Instalaciones industriales en general.	ITC MI IP 03
Depósitos de combustible de superficie	Instalaciones industriales en general	ITC MI IP 03
Instalaciones para suministro a vehículos	Estaciones de servicio, gasolineras	ITC MI IP 04
Instalaciones de almacenamiento de productos químicos. Líquidos inflamables y combustibles		MIE-APQ-01
Instalaciones de almacenamiento de productos químicos.	Botellas de gases comprimidos, líquidos y disueltos a presión.	MIE-APQ-05
Instalaciones de gases combustibles		REAL DECRETO 919/2006
Simples y otros		RD 2060/2008 (Parte general)
Equipos a presión	Calderas	RD 2060/2008 ITC EP 01
	Economizadores	RD 2060/2008 ITC EP 01
	Recalentadores	RD 2060/2008 ITC EP 01
	Tuberías de calderas	RD 2060/2008 ITC EP 01
	Equipos e instalaciones de centrales de generación eléctrica.	RD 2060/2008 ITC EP 02
	Refinerías de petróleo y plantas petroquímicas	RD 2060/2008 ITC EP 03
	Depósitos criogénicos	RD 2060/2008 ITC EP 04
	Centros de recarga de equipos de respiración autónomos	RD 2060/2008 ITC EP 05
	Centros de recarga de equipos a presión transportables	RD 2060/2008 ITC EP 05
Transporte de mercancías peligrosas por carretera		ADR (RD 551/2005)
Transporte de mercancías por ferrocarril		RID

- Tabla 2.1 Equipos e instalaciones con riesgo de explosión.

Como se observa en la tabla 2.1, en la industria en general, existen riesgos potenciales de accidentes.

Los motivos que pueden ser el origen o la fuente de las explosiones son múltiples y muy variados, entre los más comunes, hay que destacar:

- La variación de una propiedad o de una dimensión del material procesado o del objeto.
- El fallo de una (o más) partes de los aparatos, sistemas de seguridad y componentes.
- Perturbaciones externas como pueden ser: choques vibraciones, campos electromagnéticos, etc.
- Errores o deficiencias en el diseño.
- Perturbaciones en la alimentación de energía o en otros servicios.
- Pérdida de control por parte del operador (especialmente para máquinas portátiles y móviles).

Las consecuencias más comunes suelen ser:

- Roturas de equipos a presión.
- Explosiones de equipos.
- Fugas y derrames.
- Incendios.

Reducir los riesgos al manipular y tratar con este tipo de equipos o instalaciones, es prácticamente imposible, por ello tratamos de reducir los riesgos a la menor expresión posible, limitar sus consecuencias con la finalidad de proteger a las personas, los bienes y el medio ambiente.

Estas situaciones de riesgo, en ocasiones, se materializan en accidentes que pueden tener consecuencias devastadoras.

Inconscientemente aceptamos determinados riesgos sin preocuparnos demasiado, bien sea por desconocimiento, por tratarse de riesgos poco conocidos, o por despreocupación y aceptación, por tratarse de situaciones o procesos a los que se está totalmente acostumbrado.

En ambos casos, hay que asumir un determinado riesgo, pero este no debe de ser voluntario o en todo caso debe de ser semi-controlado.

Los distintos códigos de seguridad existentes en distintos países y las propias autoridades, tratan de regular los diferentes tipos de instalaciones.

Todas estas regulaciones son similares, y se aplican en las distintas áreas de actividad de la industria.

Como norma general una explosión viene seguida de un reguero de daños que pueden ser: estructurales, causados por las ondas de choque y el impacto de fragmentos, de lesiones o

muerres causadas por la explosión y el impacto, así como en las ocasiones en las que entran en juego sustancias inflamables, de radiación térmica y sus efectos.

Para poder analizar los efectos de las explosiones, se realiza un breve estudio, donde se evalúan y clasifican los riesgos, se realiza una descripción de los fenómenos que entran en juego en las explosiones, empezando con una exposición de la teoría del fuego, en la que se hace referencia a los diferentes factores que los originan y a los tipos de fuegos que se producen. A continuación se hace un análisis de las explosiones, su origen y tipos de explosiones, incluidas las explosiones de los recipientes a presión, como objeto principal de este proyecto. Se analiza también el BLEVE como un tipo especial de explosión, así como la causa que la origina.

Para poder evaluar las explosiones y sus efectos, se hace un estudio de los factores característicos de las explosiones, que son las ondas de presión, así como los efectos de las mismas sobre personas, y estructuras. Se establecen también los distintos cálculos que se utilizan para analizar sus consecuencias y poder establecer las medidas preventivas más adecuadas.

El método se puede aplicar a todos aquellos recipientes a presión, instalaciones y equipos presentes en la industria, en buques, y en unidades Offshore, en los que exista el riesgo de que pueda ocurrir una explosión.

Mediante las disposiciones legales, normas, códigos, reglamentación, que son de cumplimiento obligatorio, no se trata de limitar el uso y la utilización de los equipos e instalaciones, si no que éstos solo se limitan a establecer unas normas básicas de las actividades con el objeto de regular sobre todo la seguridad en las instalaciones.

2.1 Objeto

Entre los diferentes accidentes que pueden ocurrir en las instalaciones industriales, nos encontramos entre otros con: los escapes, los incendios, las explosiones y la formación de nubes de gas. Es importante poder tener un conocimiento de todos ellos, para poder entender su origen, causas y consecuencias.

Por sus especiales características el análisis de riesgos y consecuencias de las explosiones de los equipos o recipientes a presión, en particular a aquellas debidas a fallos de los propios equipos, son el objeto principal de estudio del presente proyecto.

2.2 Alcance

Dentro del alcance del proyecto entran todas aquellas explosiones accidentales, no deseadas, que tienen origen en las instalaciones y equipos que contengan productos inflamables, mezclas gaseosas inflamables, instalaciones en las que se producen polvos combustibles o nubes de vapores, así como todas aquellas instalaciones y equipos a presión en los que se puedan producir explosiones de recipientes de gases comprimidos, gases licuados, líquidos, líquidos combustibles o líquidos sobrecalentados.

Los recipientes e instalaciones a presión bajo el amparo del RD 2060/2008 por el que se aprueba el Reglamento de Equipos a Presión y sus ITC complementarias 1 a 6, son especial objeto de este proyecto. Se prestará especial atención a las instalaciones y equipos presentes en los centros de recarga de equipos de respiración autónomos a los que se refiere la ITC EP 05 del Reglamento de equipos a presión, ya que la normativa de equipos a presión, recoge específicamente la peligrosidad de ese tipo de instalaciones.

2.3 Antecedentes

2.3.1 Riesgos y peligros

La existencia de un riesgo no es sinónimo de daño, si no de posibilidad de daño. En ocasiones, los riesgos se materializan. Los daños que se producen pueden ser de origen físico – químico, por causa de sucesos imprevistos.

Un factor de riesgo puede ser una característica del trabajo, que puede incrementar la posibilidad de que se produzcan accidentes o afecciones para la salud de los trabajadores.

Se pueden clasificar los factores de riesgo en los siguientes grupos:

- Factores ligados a las condiciones de seguridad.
En este grupo se engloban las condiciones materiales de las instalaciones y equipos. Que pueden estar derivadas de un mantenimiento incorrecto.
- Factores ligados al medio y al ambiente de trabajo.
- Factores derivados de las características del trabajo.
- Factores derivados de la organización del trabajo. En este grupo se engloban los factores derivados de la organización del trabajo, ritmo de trabajo, comunicación y relaciones laborales, etc.

Las formas más comunes de riesgos en las instalaciones son:

- Golpes.
- Contactos térmicos
- Proyecciones.
- Incendios.
- Explosiones

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 estado de los materiales (fatiga, corrosión, etc.)

El fallo, por tanto, puede ocurrir como consecuencia de errores humanos, fallos de materiales, aparición de condiciones anormales de funcionamiento o desviación del funcionamiento habitual.

Para poder reducir los riesgos, o en su caso alcanzar un punto de control asumible, el primer paso es realizar un cumplimiento reglamentario en las instalaciones, o lo que es lo mismo, cumplir con los imperativos legales que le son de aplicación a las instalaciones.

2.3.1.1 Evaluación del riesgo

Siguiendo la metodología establecida en la Norma UNE EN ISO 14121-1, la evaluación del riesgo ha de hacerse para cada caso particular, incluyendo:

- Identificación de peligros.
- Determinar si se puede producir la atmósfera explosiva y la cantidad implicada.
- Determinar la presencia y la posibilidad de que existan fuentes de ignición que sean capaces de producir la ignición de la atmósfera explosiva.
- Determinar los efectos posibles de una explosión.
- Estimar el riesgo.
- Considerar las medidas para reducir los riesgos

El RD 1196/2003 por el que se aprueba la directriz básica de protección civil, establece que:

Los accidentes son todos aquellos sucesos que sean consecuencia de un proceso no controlado durante el funcionamiento normal de cualquier instalación industrial. Pueden originar los accidentes:

- Emisiones, fugas o vertidos de sustancias peligrosas.
- Incendios y explosiones de sustancias peligrosas.

El abanico de sustancias que se consideran peligrosas, está cubierto por el Anexo I del RD 1254/1999 y posteriores modificaciones, por el que se aprueban medidas de control de riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas. El Objeto del RD 1254/199 es la prevención de los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas, así como la limitación de sus consecuencias con la finalidad de proteger a las personas, los bienes y el medio ambiente. Las sustancias peligrosas, se definen en el anexo I del RD.

El daño puede estar ocasionado por los siguientes fenómenos peligrosos:

- a) Fenómenos de tipo mecánico: ondas de presión y proyectiles.
- b) Fenómenos de tipo térmico: radiación térmica.
- c) Fenómenos de tipo químico: nubes tóxicas

Así la directriz básica de protección civil, establece tres categorías para los accidentes:

- Categoría 1: aquellos para los que se prevea, como única consecuencia, daños materiales en el establecimiento accidentado y no se prevean daños de ningún tipo en el exterior de éste.
- Categoría 2: aquellos para los que se prevea, como consecuencias, posibles víctimas y daños materiales en el establecimiento; mientras que las repercusiones exteriores se limitan a daños leves o efectos adversos sobre el medio ambiente en zonas limitadas.
- Categoría 3: aquellos para los que se prevea, como consecuencias, posibles víctimas, daños materiales graves o alteraciones graves del medio ambiente en zonas extensas y en el exterior del establecimiento.

Peligro: la capacidad intrínseca de una sustancia o la potencialidad de una situación física para ocasionar daños a las personas, los bienes y el medio ambiente

2.3.2 Teoría del fuego

Para poder tener una comprensión en conjunto de los diferentes factores que pueden afectar a una instalación se realiza una exposición de las principales características del fuego, puesto que después de los escapes es la segunda fuente de accidentes.

En el estudio de las características del fuego, para su aplicación al incendio, es importante conocer los mecanismos que lo originan, que lo mantienen, así como los que lo transmiten.

2.3.2.1 Incendios

El incendio representa una manifestación no deseada del fuego que se desarrolla sin control en el tiempo y en un momento y lugar imprevisto, provocando daños y pérdidas.

El fuego puede ser definido como un fenómeno de reacciones químicas de oxidación reducción con un elevado potencial exotérmico.

Este tipo de reacciones de oxidación reducción, implica una pérdida o ganancia de electrones, el intercambio, necesita un consumo de energía que al ser cedida al entorno, recibe el nombre de reacción exotérmica.

Los efectos de los incendios pueden resultar devastadores y ser incontrolados, por lo que la predicción de los efectos de un incendio es muy importante, tanto en lo que atañe al establecimiento de distancias de seguridad, como en la determinación de los caudales de refrigeración.

2.3.2.2 Fuentes de ignición

Combustible es cualquier sustancia que, en presencia del oxígeno y aportándole una cierta energía de activación, es capaz de arder. El comburente es el elemento en cuya presencia el combustible puede arder. Se considera el oxígeno como el comburente típico. Y la energía de activación, es la energía mínima que necesitan el combustible y el comburente para que se inicie la reacción. Esta energía se aporta en forma de calor.

Los focos de ignición son aquellos que aportan la energía de activación necesaria. Estos pueden ser:

- Focos térmicos, (cigarrillos, cerillas, soldadura, hornos, calderas), proceden de focos caloríficos de elevadas temperaturas.
- Focos eléctricos, (sobrecargas, chispas, cortocircuitos, cargas electrostáticas, rayos,)
- Focos mecánicos, (herramientas manuales, roces mecánicos), proceden del roce entre materiales
- Focos químicos, (reacciones exotérmicas), son todas aquellas que se producen a consecuencia del contacto con sustancias reactivas o que desencadenan reacciones exotérmicas.

- Otros tipos focos: Son menos comunes, pero pueden originar de igual manera la ignición de una mezcla. Entre ellos podemos destacar: las radiaciones ionizantes, corrientes parásitas, corriente debida a la protección catódica, Ondas electromagnéticas, los ultrasonidos.

La energía de activación varía en función de los siguientes parámetros: la mezcla del producto inflamable, la concentración, la presión y la temperatura.

En ocasiones se necesita una energía de activación muy pequeña para que se produzca la ignición, del orden de los (mJ).

2.3.2.3 Triángulo del fuego

Para que exista una combustión es necesario que se encuentren presentes tres elementos: oxígeno (comburente), calor y combustible. Se representa gráficamente por un triángulo, en el que cada uno de sus lados corresponde con uno de los elementos. Si alguno de estos lados no está presente, la combustión no se produce.

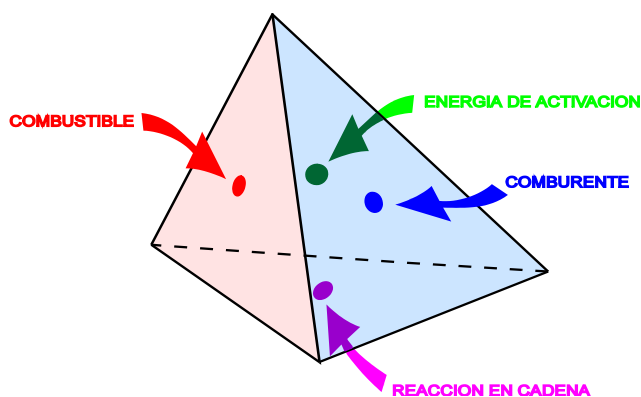


- Fig. 2.3.2.3.1 Triángulo del fuego

Debido a fenómenos dentro de la llama, que no se correspondían con esta similitud, se introdujo el siguiente concepto.

2.3.2.4 Tetraedro del fuego

El proceso se compara con un tetraedro, al introducir un nuevo elemento, la reacción en cadena. De modo que cada una de las caras que forman el tetraedro son: Oxígeno (comburente), calor, combustible y reacción en cadena. Al igual que en el triángulo del fuego, en el tetraedro del fuego al suprimir uno de los componentes, deja incompleto el mismo y por tanto no se produce el fuego.



- Fig. 2.3.2.4.1 Tetraedro del fuego.

2.3.2.5 Relación comburente combustible

Solamente los gases como tales y los vapores procedentes de los procesos de fusión y o vaporización pueden desarrollar el fuego.

Para llegar a la posibilidad del inicio del fuego se ha necesitado otro factor fundamental, la energía.

2.3.2.6 Relación combustible energía

La relación entre oxidante y reductor solo se logra mediante el aporte de una energía necesaria que aumenta la rapidez del proceso, así, los sólidos requieren un mayor aporte de energía durante un tiempo más prolongado, mientras que en los líquidos, este tiempo y energía es mucho menor. En los gases, solo se requiere de la energía necesaria que active el proceso del fuego.

2.3.2.7 Temperatura de flash

Es la mínima temperatura a la que un combustible emite vapores susceptibles de mezclarse con un comburente en cantidad suficiente para que ante una energía de activación pueda producirse una combustión de dichos vapores, pero sin un proceso de continuidad.

2.3.2.8 Temperatura de encendido

La temperatura de autoencendido es una temperatura de escala superior a la de flash. Una vez alcanzada esta temperatura y una vez iniciada la ignición, la velocidad de aporte de los vapores emitidos es suficiente como para mantener la llama.

La temperatura de encendido representa la continuidad del fuego, ya que aún siendo interrumpida la energía de activación, la propia continuidad de la llama durante al aporte de gas o vapor, incrementa la propia temperatura y la del ambiente por su característica exotérmica. Esa continuidad solo se romperá cuando falte el combustible o el comburente.

2.3.2.9 Temperatura de autoencendido

Son temperaturas situadas entre los 200 y los 500 °C y concretas para cada combustible. Una vez alcanzada esta temperatura, el combustible se auto enciende sin necesidad de la presencia o el aporte de energía adicional.

2.3.2.10 Igniciones espontaneas

En unas condiciones determinadas de temperatura anormalmente alta, escasa ventilación y materiales combustibles en estados especiales, se puede originar un fenómeno de descomposición química oxidoreductor que finalizará con el resultado de un incendio.

2.3.2.11 Límites de explosividad

Los vapores de líquidos y gases combustibles tienen unos límites de mezcla que acotan las concentraciones mínima y máxima de su fase de combustible con el complemento de la mezcla, para alcanzar el 100% de la mezcla, así, el límite inferior de explosividad (LIE), es el valor mínimo de mezcla combustible comburente, por debajo del cual la concentración de vapor o gas combustible es insuficiente para crear una mezcla inflamable con el comburente.

El límite superior de explosividad (LSE) indica el valor máximo de concentración, superado el cual el vapor o gas deja insuficiente porcentaje de comburente de la mezcla inicialmente inflamable.

2.3.2.12 Mecanismos de transmisión del calor

- Transmisión por conducción.

La transmisión por conducción requiere de contacto físico de los cuerpos con un gradiente de temperatura entre ellos.

- Transmisión por convección.

La transmisión por convección es un mecanismo propio de los fluidos, originado por corrientes debidas a diferencias de densidad.

- Transmisión por radiación.

La propagación por radiación se realiza desde cuerpos calientes por radiaciones.

2.3.3 Clases de fuego

La norma UNE EN 2:1994 y 2005 establece un total de cinco las clases de fuego, siendo:

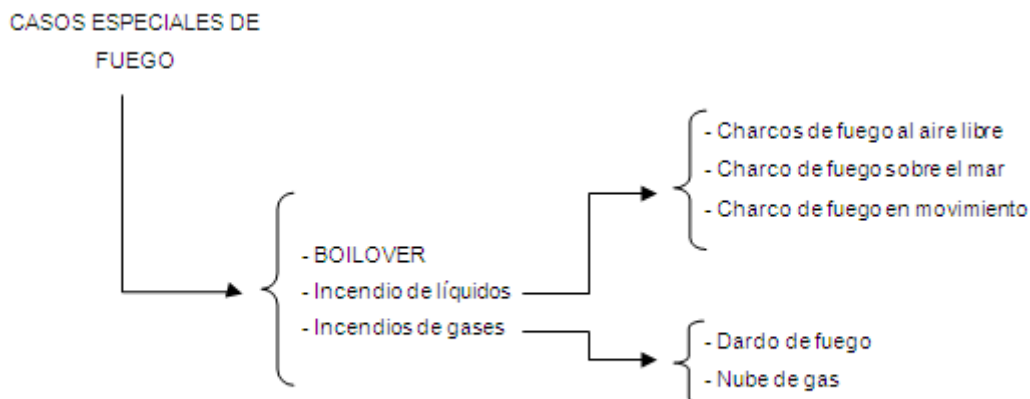
- Clase A: Son los fuegos de materiales sólidos, generalmente de naturaleza orgánica, cuya combustión se realiza normalmente con la combustión de brasas.
- Clase B: Son los fuegos correspondientes a líquidos o sólidos licuables.
- Clase C: Son fuegos de gases.
- Clase D: Son fuegos de metales.
- Clase F: Son los fuegos originados en aparatos de cocinas.

Asimismo, existe otro tipo de clasificación del fuego, en función de donde se desarrolle, éste puede ser:

- Interior: Son aquellos fuegos que tienen lugar en el interior de los edificios, sin haber llegado a manifestarse en el exterior. Debido a que el fuego se está desarrollando en combustión incompleta por la falta de oxígeno, debe de ponerse especial cuidado en no aportar comburente durante su extinción.
- Exterior: Son aquellos fuegos que presentan una manifestación visible de llamas al exterior.

2.3.4 Casos especiales de fuego

Por sus especiales características, para el objeto de estudio de este proyecto, prestaremos especial atención a los fenómenos especiales que se producen en los fuegos de los líquidos y de los gases. Entre los que hay que destacar:



- Fig. 2.3.4.1 Esquema casos especiales de fuego.

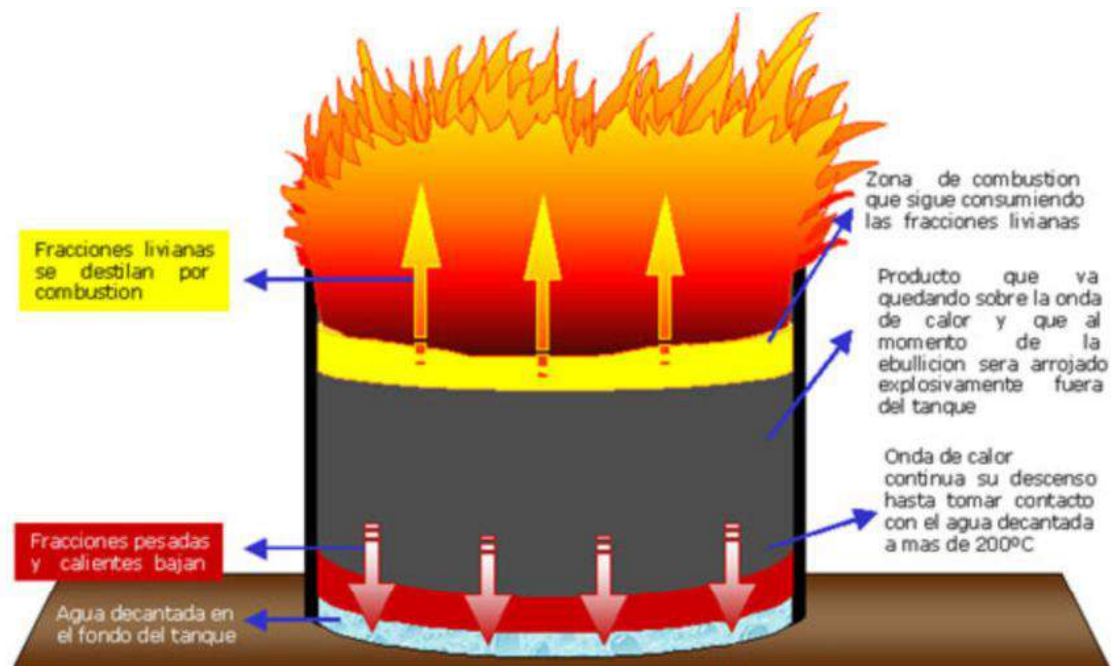
2.3.4.1 Boilover

Este fenómeno, de efectos devastadores, es característico de incendios de combustibles líquidos, principalmente es debido a la transición rápida de fase que puede ocurrir cuando dos líquidos con temperaturas de ebullición muy diferentes entran en contacto. Existen tres mecanismos de rebosamiento, dependiendo de las circunstancias.

- Rebosamiento por ebullición. (Boilover)
- Rebosamiento superficial. (Sloper)
- Rebosamiento espumoso. (Frothover)

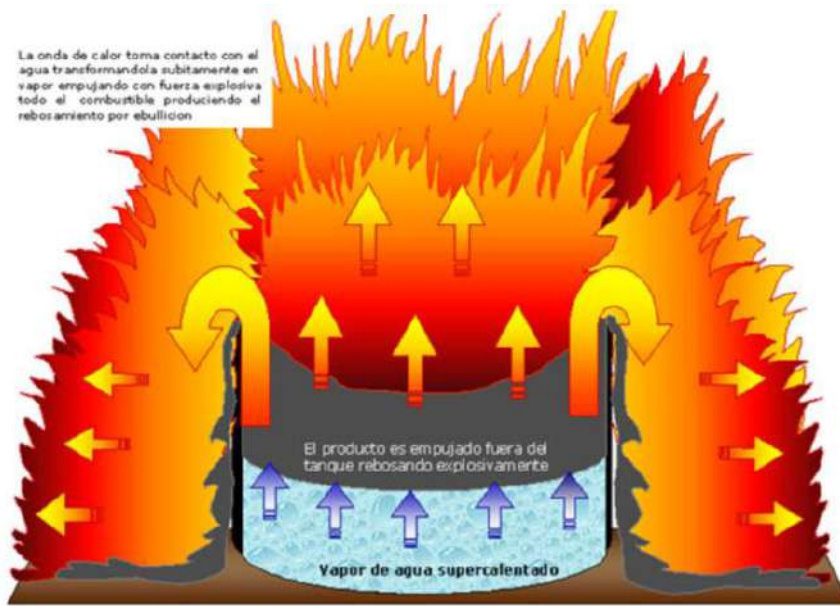
De estos tres fenómenos el Boilover, es el más peligroso, debido a su potencial intensidad. Puede producirse un súbito rebose del contenido de la depósito, causado por la ebullición del agua que contiene el depósito, que puede encontrarse en el fondo del depósito por decantación o por encontrarse diluida.

También puede producirse el Boilover, por un fuego en un depósito que contenga una mezcla de productos de composición diversa, con distintos puntos de ebullición. Tal y como se muestra en la figura 2.3.4.1.1, se observan las diferentes capas del fuego en un incendio de un depósito de combustible.



- Fig. 2.3.4.1.1 Capas de fuego en un incendio de un depósito de combustible.

En la figura 2.3.4.1.2, se observa que en el momento en el que el agua entra en ebullición, el combustible que se encuentra ardiendo, es empujado con fuerza explosiva.



- Fig. 2.3.4.1.2 Representación del BOILOVER en un depósito de combustible.

2.3.4.2 Incendio de líquidos

Por sus características, los fuegos de líquidos están más controlados por estar éstos localizados en bidones, recipientes, depósitos, etc, sin embargo, durante las diversas operaciones (carga, descarga, trasvase, trasiego, etc), cuando por circunstancias se derraman, bien sea por la rotura de tuberías, rebose de tanques, vuelcos o caídas de recipientes, los líquidos pueden originar grandes superficies, que pueden dar lugar a diferentes tipos de incendio según sean las circunstancias de su alrededor. Éstos pueden ser entre otros:

- Charcos de fuego al aire libre. Los charcos de fuego al aire libre se originan cuando se produce un escape o vertido de un líquido combustible sobre el suelo y en el exterior
- Charco de fuego sobre el mar. El combustible se derrama sobre el mar.
- Incendios en movimiento. El incendio se desplaza hacia donde se desplaza el líquido.



- Fig. 2.3.4.2.1 Incendio de charco de forma circular

2.3.4.3 Incendio de gases

Por su estado físico, los gases resultan más fácilmente inflamables, aunque no todos los gases son combustibles, como por ejemplo: O₂, N₂, Halones.

Si bien tienen en común el encontrarse en condiciones de extrema peligrosidad al estar contenidos a presión, licuados o en estado criogénico, en botellas o en tanques, que en caso de verse afectados por temperaturas elevadas podrían estallar violentamente y proporcionar el aporte energético necesario para otros focos de ignición.

El peligro real está en el volumen, supuestamente engañoso, que presentan las botellas o recipientes que los contienen, ya que, tanto si están presurizados como si están licuados o criogenizados, su pequeño volumen representa una gran cantidad de litros en estado de gas.

Por sus características especiales de riesgo, las botellas y los recipientes que contienen los gases, se encuentran normalizadas en España a través de:

- RD 2080/2008 por el que se aprueba el reglamento de quipos a presión y sus instrucciones técnicas complementarias.
- Real Decreto 379/2001, de 6 de abril, por el que se aprueba el Reglamento de almacenamiento de productos químicos y sus instrucciones técnicas complementarias, en especial su ITC MIE APQ-5 (almacenamiento de botellas y botellones de gases comprimidos licuados y disueltos a presión).
- REAL DECRETO 919/2006, de 28 de julio, por el que se aprueba el Reglamento técnico de distribución y utilización de combustibles gaseosos y sus instrucciones técnicas complementarias ICG 01 a 11

Según como se produzca el escape de gas, se pueden producir los siguientes tipos de fuegos:

- Dardo de fuego:

Tanto en las conducciones como en los depósitos de gas a presión, la aparición de una pequeña fisura en las paredes trae como consecuencia la descarga del gas contenido formando un chorro de gas a presión. Si durante la descarga este chorro entra en contacto con una fuente de ignición, el resultado será la formación de un incendio en forma de chorro o, como normalmente se le llama, dardo de fuego o "jet fire"

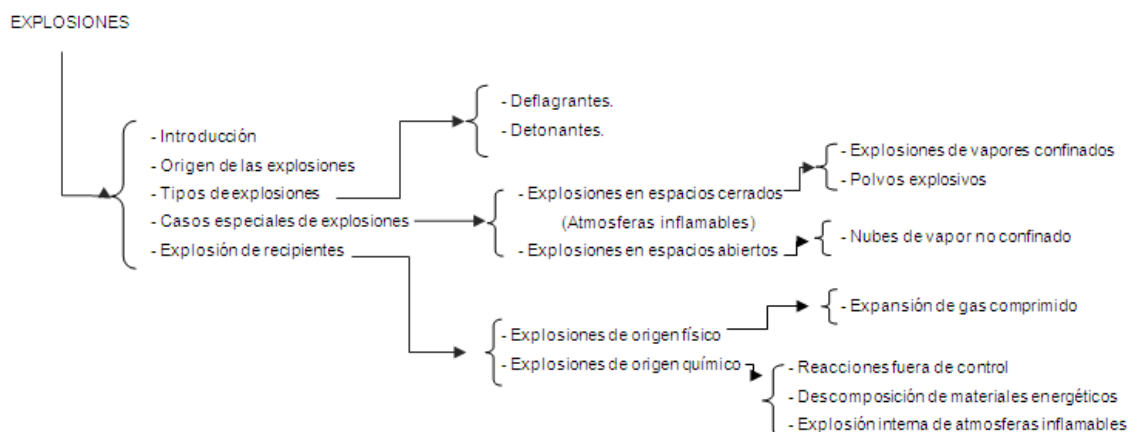
- Nube de gas:

Este tipo de incendio tiene lugar cuando se produce el escape de un gas o un vapor inflamable, de manera que se forma una nube que se va dispersando hasta que encuentra una fuente de ignición, (normalmente superficies calientes, chispas, motores eléctricos, etc.), una parte de esta masa de gas (la que se encuentra entre los límites de inflamabilidad de la sustancia de que se trate), deflagra por efecto de la fuente de ignición y se produce la explosión.



- Fig. 2.3.4.3.1 Dardo de fuego

2.3.5 Explosiones



- Fig. 2.3.5.1.1 Esquema de diferentes tipos de explosiones.

2.3.5.1 Introducción

Determinadas igniciones de combustible y su posterior combustión presentan manifestaciones que resultan espectaculares por su intensidad y efectos destructivos, estos casos se denominan explosiones.

Una explosión es esencialmente una propagación automantenida de la zona de reacción en la atmosfera explosiva.

Se puede definir una explosión como una liberación repentina de energía, que genera una onda de presión que se desplaza alejándose de la fuente que la origina, al mismo tiempo que va perdiendo energía con el tiempo. La liberación de energía es bastante rápida y concentrada para que la onda que se genere sea audible.

Las explosiones son motivadas especialmente por la velocidad de reacción. Las velocidades de propagación superiores a las normales de (1 m/s) generan Ondas de Presión de mayor a menor cuantía, que en función de si se desarrollan en espacios abiertos o cerrados, tendrán facilidad para su disipación o sufrirán un proceso aún mayor de compresión.

La generación de presiones elevadas propias de las explosiones se caracteriza por el valor de la velocidad máxima de elevación de la presión, obtenido por el ángulo que forman las tangentes de dichas elevaciones, y que constituye un parámetro de comparación, que se puede representar en curvas que permiten diferenciar un tipo de explosión de otro.

2.3.5.2 Origen de las explosiones

Una explosión, rápidamente, se asocia con una imagen de destrucción.

- **Las explosiones que son consecuencia de un incendio**

Este tipo de explosiones no tienen por qué estar asociadas al incendio, pero si están producidas por él. Ello ocurre cuando las llamas inciden en la parte exterior de un recipiente o tubería, calentándolo. El calor originado en un incendio de cualquier tipo puede dar lugar a explosiones

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

- **Explosiones que son consecuencia de otras explosiones**

Una explosión puede desencadenar fugas, incendios y otras explosiones. Por una parte la onda explosiva puede deformar y hasta destruir otros equipos o recipientes. Por otro lado, puede lado los proyectiles procedentes de una explosión pueden causar efectos similares.

No es necesario que se generen daños para poder considerar este fenómeno como explosión. La energía liberada puede haber sido almacenada inicialmente bajo una gran variedad de formas: Eléctrica, nuclear, química, o de presión.

Esta última es la que nos ocupa para el propósito de este proyecto

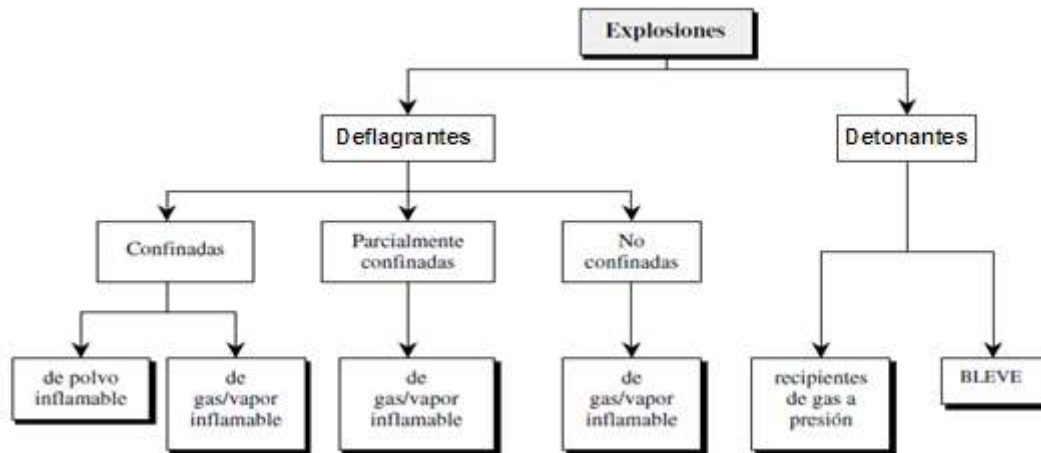
2.3.5.3 Tipos de explosiones

En la tabla siguiente, tabla 2.3.5.3.1 se muestran ejemplos típicos de diferentes tipos de explosiones

Tipo de explosión	Ejemplo
Transición rápida de fase	Introducción de aceite caliente en un recipiente con agua.
BLEVE	Mezcla de GNL y agua Fallo por corrosión de una caldera. Rotura de un depósito de GLP
Explosión de recipiente a presión	Fallo mecánico de un recipiente que contiene gas a presión Sobrepresión de un recipiente que contiene gas a presión Fallo del sistema de alivio (válvula de seguridad) durante una sobrepresión de un recipiente a presión

- Tabla 2.3 5.3.1 Ejemplos de distintos tipos de explosiones.

Según la velocidad de propagación, las explosiones se dividen en dos grupos:

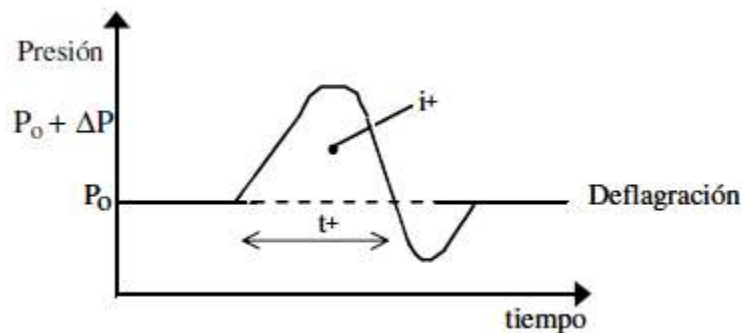


- Fig. 2.3.5.3.2 Tipos de explosiones según su velocidad de reacción.

2.3.5.3.1 Deflagrantes

Este tipo de explosiones las constituyen aquellas que, partiendo de velocidades de reacción entre 1 (m/s) y la velocidad del sonido, crean ondas de presión que no alcanzan valores de presión superiores a 10 Kg/cm².

En la figura 2.3.5.3.1.1 se muestra la evolución de una onda de presión



- Fig. 2.3.5.3.1.1.1 Evolución en el tiempo de una onda de presión deflagrante.

Este tipo de explosiones es característica de atmosferas pulverulentas o de vapores de líquidos combustibles.

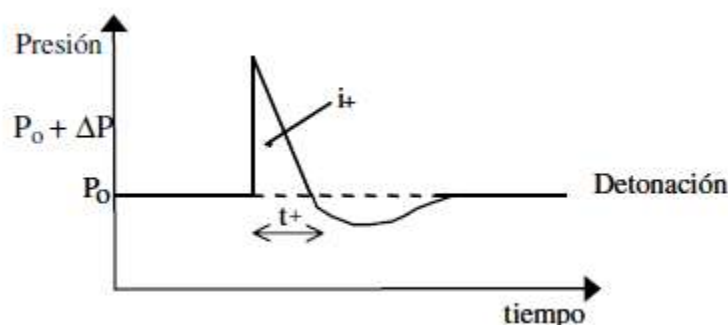
Una explosión deflagrante, tendrá menos consecuencias, si ocurre en lugares abiertos que permitan la disipación de las ondas de presión que se generen, que si se produce la deflagración en un lugar cerrado.

2.3.5.3.2 Detonantes

Este tipo de explosiones son generadas por velocidades de reacción superiores a la velocidad del sonido, sin tener un techo límite. Las ondas de presión generan ondas de choque de alta potencia energética que transmiten a su vez nuevas explosiones detonantes.

Este fenómeno es característico de los gases combustibles que discurren por tuberías

En la figura 2.3.5.3.2.1 se representa la evolución de la onda de presión detonante en el tiempo



- Fig. 2.3.5.3.2.1 Evolución en el tiempo de una onda de presión detonante.

2.3.5.4 Casos especiales de explosiones

Según el tipo de producto implicado, así como el lugar donde tienen origen las explosiones, se presentan los siguientes tipos especiales de explosiones.

2.3.5.4.1 Explosiones en espacios cerrados, Atmosferas inflamables

El peligro de explosión está relacionado con los materiales y sustancias procesadas en los equipos. Algunas de estas sustancias pueden sufrir procesos de combustión en el aire. Estos procesos, a menudo, van acompañados de un desprendimiento de grandes cantidades de energía, calor, y pueden estar asociadas a un incremento de presión y a un desprendimiento de sustancias peligrosas.

Podemos diferenciar dos tipos de explosiones en espacios cerrados:

- Explosiones de vapores confinados (CVE, confined vapor explosion)

Este tipo de explosiones ocurren cuando habiéndose producido un escape de un gas o de un vapor inflamable en un área confinada, el gas está dentro de los límites de inflamabilidad y encuentra un punto de ignición que origine la combustión de las mismas.

- Polvos explosivos

Se ha estudiado que prácticamente todos los sólidos en circunstancias especiales, en un estado pulverulento, pueden generar un fenómeno de explosión. Este tipo de explosiones ocurren en espacios confinados, tales como silos o depósitos. Las condiciones para que un

polvo sea o no explosivo, en caso de serlo, están relacionadas con las condiciones de la reacción, es decir:

- La potencia calorífica.
- La velocidad de reacción
- El volumen de los gases generados.
- La expansión, (efecto térmico de la potencia calorífica) de una gran cantidad de gases, (volumen de gases generados) a una gran velocidad (velocidad de reacción), son los efectos determinantes que caracterizan toda reacción explosiva.

2.3.5.4.2 Explosiones en espacios abiertos

- Ignición de nubes de vapor no confinado (UVCE, unconfined vapor cloud explosión)

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, estas nubes, se pueden generar por la fuga de un gas de un recipiente o por la evaporación de un líquido que se ha liberado de un recipiente. Estas explosiones pueden dar lugar a temperaturas muy elevadas, y generar una onda de presión. Este tipo de explosiones, puede ocasionarse incluso fuera de los límites de la instalación en la que se generaron.

Puesto que no todas las mezclas son inflamables y no todos los gases son inflamables, 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.

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.

2.3.6 Explosión de recipientes

Las causas por las que se puede producir la rotura de un recipiente son diversas.

Pero fundamentalmente hay dos razones por las que falla un recipiente a presión, que son:

- Por debilidad estructural (corrosión, erosión, fatiga, defectos de los materiales, etc.), por impactos externos.
- Por aumento de la presión debido a diferentes causas (sobrellenado, reacción fuera de control, explosión interna, fallo de un sistema de seguridad o control, o una explosión interna.)

Hay una tercera causa que es 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. Estas explosiones son mucho más violentas y pueden causar mucho daño, especialmente cuando los contenidos son inflamables, ya que a la onda de presión que se genera al estallar el recipiente, hay que sumar la inflamación y consecuentemente el incendio del producto contenido.

Existe un caso especial de explosiones de recipientes, que es el que se puede llegar a producir cuando se realizan pruebas de presión.

Periódicamente, los distintos códigos, normas y reglamentos, establecen, dependiendo del tipo de recipiente a presión, así como dependiendo del uso, que deben de ser sometidos a una prueba de presión. Estas pruebas pueden ser hidráulicas o neumáticas. Se realizan a la presión de prueba, que depende del tipo de recipiente, y suelen estar indicada por el fabricante del equipo.

El objetivo principal de estas pruebas es verificar el correcto funcionamiento del equipo. Hay que tener en cuenta el objetivo principal es buscar un fallo en el recipiente. Y que este puede llegar a ocurrir.



- Fig. 2.3.6.1 Rotura de un recipiente a presión durante una prueba de presión.

2.3.6.1 Tipos de roturas de los recipientes a presión:

Las roturas de los recipientes, pueden clasificarse en dos tipos dependiendo de la deformación plástica del material que acompaña a la rotura:

Las roturas de los recipientes se clasifican en dúctiles y frágiles.

- Roturas dúctiles: son las más frecuentes en la industria, producen pocos fragmentos de gran tamaño, con un elevado potencial para producir daños. Este tipo de roturas, tienen lugar después de una intensa deformación plástica y se caracteriza por una lenta propagación de la grieta.
- Roturas frágiles producen fragmentos de menor tamaño, tienen lugar sin una apreciable deformación y debido a una rápida propagación de la grieta



- Fig. 2.3.6.1.1 Rotura de un equipo de respiración autónomo.

En base a esto, 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, pueden 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.

Por lo tanto los efectos de la explosión y la fragmentación dependen directamente de la energía disponible en el interior. Esta energía interna es una función de las propiedades termodinámicas y de la masa del contenido del recipiente, está prácticamente determinada por dos parámetros:

- La condición del recipiente en el momento de la rotura,
- La condición del contenido del recipiente.

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. 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.

2.3.6.2 El origen de las explosiones de los recipientes

El origen de las explosiones de los recipientes, puede ser debido a:

2.3.6.2.1 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.

Hay que aclarar las explosiones que tienen como variable que los define la variación súbita de la presión, se denomina sobrepresión.

2.3.6.2.2 Explosiones de origen químico

Dentro de las explosiones, son de gran importancia, las generadas por reacciones químicas indeseadas o incontroladas, como pueden ser entre otras:

- Reacciones fuera de control.
- Descomposición de un material energético.
Este tipo de explosiones sucede cuando una sustancia en el interior de un recipiente se descompone violentamente sin necesidad de un comburente. Un ejemplo típico de este tipo de explosiones es la que sucede con la descomposición de nitrometano.
- Explosión interna de atmósferas inflamables.
- Reacciones de reactantes o de productos con el agua.
- Reacciones de reactantes o de productos con el aire.
- Reacciones descontroladas por aceleración térmica.

2.3.7 BLEVE

El acrónimo BLEVE, está formado por las cinco iniciales, en Ingles, correspondientes a “ Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion”. Su traducción literal es “expansión explosiva del vapor de un líquido en ebullición”.

El BLEVE es un caso especial de explosión muy característica, y de efectos devastadores, que se da en depósitos o recipientes en los que se almacena un líquido bajo presión. Contrariamente a lo que se pueda pensar inicialmente, este tipo de explosiones no siempre tiene asociados efectos térmicos. Esto depende del tipo de sustancia involucrada, por ejemplo con líquidos inflamables. Es por tanto muy importante poder diferenciar el fenómeno BLEVE, de su evolución incendiaria y explosiva posterior.

Cuando se almacena un líquido a presión elevada (normalmente a su presión de vapor a la temperatura de almacenamiento), la temperatura de almacenamiento suele ser notablemente mayor que su temperatura de ebullición normal. Cuando se produce la ruptura mecánica del recipiente, el líquido de su interior entra en ebullición rápidamente debido a que la temperatura exterior es muy superior a la temperatura de ebullición de la sustancia. El cambio masivo a fase vapor, provoca la explosión del depósito porque se supera la resistencia mecánica del mismo. Se genera una onda de presión acompañada de proyectiles del propio depósito y piezas menores unidas a él que alcanzan distancias considerables. Además, en el caso de que la sustancia almacenada sea un líquido inflamable, se produce la ignición de la nube formando lo que se denomina bola de fuego que se irá expandiendo a medida que va ardiendo la masa de vapor

A continuación, se definen los factores y mecanismos que contribuyen a que se produzca el BLEVE.

En principio el BLEVE, puede darse incluso en los líquidos no inflamables como el agua, donde no median reacciones químicas ni combustiones, por lo que también puede ocurrir en instalaciones con calderas de vapor.

2.3.7.1 Causas que originan el BLEVE

Las causas principales para que se pueda producir son tres:

- Que el líquido esté sobrecalentado.
- Que se dé una súbita y rápida bajada de presión (despresurización brusca), que puede estar provocada por fisuras (rotura del recipiente, impactos mecánicos sobre el recipiente) o acción de discos de ruptura, directos al depósito.
- En relación con las dos anteriores, que la presión y la temperatura concretas, para cada producto permita la nucleación espontanea (formación súbita y simultanea de de burbujas en toda la masa del líquido), provocando una evaporación rapidísima.

Se analizan cada uno de estos factores, por separado:

2.3.7.1.1 Sobrecaentamiento

El líquido sobrecaentado es corriente en los gases licuados (GLP, amoniaco, cloro) y algunos gases criogénicos. Por otra parte, también pueden cumplirla líquidos contenidos en recipientes cerrados que se ven sometidos a un calentamiento anómalo, por ejemplo, por la radiación de un incendio; y, como ya se ha dicho anteriormente, también la cumple el agua a presión en el interior de una caldera.

El líquido que se encuentra en estas condiciones de inestabilidad se define como “líquido sobrecaentado”

2.3.7.1.2 Despresurización súbita

De forma que se reduzca instantáneamente la presión a la que se encuentra toda la masa de líquido contenida en el recipiente. Un fenómeno de este tipo suele provocar, en caso de accidente, la rotura del depósito, ya sea por el incremento excesivo de la presión interior y, simultáneamente, por el calentamiento excesivo de las paredes a causa de un incendio, o ya sea por un impacto. Sea cual sea la razón, la sustancia contenida en el recipiente pasa en un instante desde la presión a la que estaba almacenada, extraordinariamente alta si el recipiente había estado sometido a la acción de un incendio, a la presión para la que la vertical trazada por el punto de equilibrio en la curva P-T en la que se encontraba el líquido, corta a la recta límite de sobrecaentamiento

2.3.7.1.3 Nucleación espontanea

Cuando se dan las dos condiciones anteriores se produce una vaporización casi instantánea con formación de núcleos de vaporización en toda la masa (nucleación homogénea). Se ha sugerido la formación de “un millón de núcleos de ebullición por milímetro cúbico y milisegundo”. En estas condiciones, la velocidad de incremento del volumen es extraordinaria y la violencia de la explosión es muy elevada. Éste es, estrictamente hablando, el fenómeno asociado a la explosión BLEVE

También es usual encontrar el líquido sobrecaentado cuando por causas externas como el fuego, sufre un calentamiento al verse contenidos en recipientes herméticos, lo que a su vez produce un aumento de presión.

La segunda condición, significa el descenso súbito de la presión interna del recipiente por causas mecánicas, golpes, zonas débiles o defectos estructurales, incluso por la apertura de las válvulas de seguridad, o por causas térmicas que están relacionadas con la resistencia de los materiales al fuego.

En el caso de recipientes que contengan un producto en dos fases, (fase líquida y fase gaseosa), la parte del recipiente que está en contacto con la fase gaseosa, se encuentra refrigerada por el propio líquido, siendo la parte del recipiente en contacto con la fase gaseosa la que primero sufre la pérdida de resistencia mecánica, llegando un momento en el que las paredes no podrán resistir la elevada tensión a la que están sometidas y cederán.

También se puede facilitar el descenso súbito de la presión interna del recipiente, por la acción de las válvulas de seguridad, que pueden encontrarse taradas a presión superior a la del punto crítico o cuando las válvulas de seguridad permiten la evacuación de grandes caudales de producto, ocasionando la rápida caída de la presión, antes de que el resorte de la válvula vuelva a cerrarse, hecho posible cuando los valores de inercia son altos.

2.3.7.1.4 Transmisión rápida de fase

El incremento extraordinario de volumen que experimenta un líquido al vaporizarse, que es de unas 1.700 veces en el caso del agua y de unas 250 veces en el caso del propano, más la expansión del vapor preexistente, provocarán una onda de presión (explosión, estallido del depósito), así como la rotura del recipiente en varios pedazos que serán lanzados a una distancia considerable.

En este tipo de vaporizaciones críticas, la sobrepresión causada por la transmisión rápida de fase (RPT) por la interacción del GNL y el agua, también son típicas en instalaciones en las que se opera con GNL (Gas Natural Licuado), tales como regasificadoras, plantas de licuefacción, e instalaciones de transporte en Buques de Gas Natural Licuado.

Según lo especificado en la normativa de referencia al efecto Norma UNE EN 1160

El GNL o LNG o gas natural licuado es un fluido incoloro e inodoro en estado líquido compuesto predominantemente de metano.

El GNL es una mezcla de hidrocarburos compuesta principalmente de metano y que puede contener cantidades pequeñas de etano, propano, nitrógeno u otros componentes que se encuentran normalmente en el gas natural.

La densidad del GNL depende de su composición y se encuentra normalmente entre 430 kg/m³ y 470 kg/m³, pero puede llegar a ser superior.

La temperatura del GNL depende de su composición, pero este normalmente tiene una temperatura de ebullición comprendida entre los -166 °C y -157°C a la presión atmosférica.

Los riesgos potenciales ligados a la manipulación del LNG son debidos esencialmente a tres propiedades principales:

El LNG es sumamente frío. A la presión atmosférica, dependiendo de su composición, el punto de ebullición está alrededor de -160 °C. A esta temperatura es más denso que el aire ambiente.

Cantidades muy pequeñas de líquido se convierten en volúmenes grandes de gas. Un volumen de LNG produce aproximadamente 600 volúmenes de gas. Aproximadamente 1 m³ de líquido de LNG produce aproximadamente del orden de 600 m³ de gas

El gas natural, como todos los demás hidrocarburos gaseosos, es inflamable. En condiciones ambientales, la mezcla de aire y gas natural es inflamable cuando el contenido del gas natural está comprendido aproximadamente entre el 5 % y el 15 % del volumen.

En caso de producirse el contacto entre el agua y el GNL se pueden provocar sobrepresiones súbitas que al encontrarse en un sistema cerrado, pueden factiblemente superar con creces las presiones de diseño, dando lugar a situaciones de alto riesgo.

Hay que decir que cuando se produce un derrame de GNL sobre el agua, la convección en el agua es tan intensa que la velocidad de evaporación por unidad de superficie permanece constante. El tamaño de la capa de GNL derramado aumenta hasta que la cantidad de gas que se evapora sea igual a la cantidad de líquido producido por la fuga.

Es de destacar que aunque este es un fenómeno raro y de consecuencias limitadas, se puede llegar a producir, por lo que cuando entran en contacto dos líquidos a dos temperaturas diferentes pueden aparecer fuerzas explosivas en ciertas circunstancias. Este fenómeno, llamado de transición rápida de fases (TRF), puede producirse cuando entran en contacto GNL y agua. Aunque no se produce combustión, este fenómeno tiene todas las demás características de una explosión.

Si la sustancia contenida inicialmente en el recipiente no es combustible, la onda de sobrepresión y la proyección de fragmentos serán los únicos efectos de la explosión. Este sería el caso de la explosión de una caldera de vapor que contuviera, evidentemente, agua.

2.3.8 La onda de presión

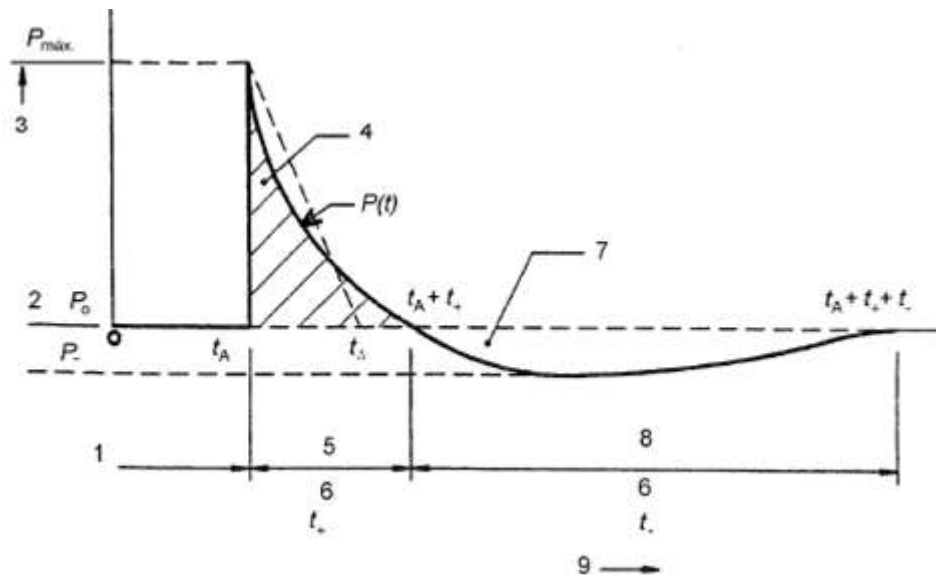
Para tener un conocimiento de la onda de presión, de tipo explosivo, es necesario conocer los parámetros del flujo de la onda en todo instante, así como su evolución.

Se han definido las ondas como un fenómeno de transmisión de energía sin que haya transporte de materia, es evidente que la energía que se propaga, la contiene el foco emisor.

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.

De todos los parámetros asociados a la onda generada en la explosión, existen dos variables primarias, que son: la sobrepresión y el impulso. Para poder conocer los daños que produce una explosión, es necesario hacer un estudio de su comportamiento.

Cuando se produce una explosión, entran en juego una serie de factores y de fenómenos, que de forma general, se muestran en la Fig. 2.3.8.1, y que se describen a continuación.



- Fig. 2.3.8.1 Representación de la evolución de las fases de una explosión.

Donde:

1 Tiempo de llegada

2 Ambiente.

3 Presión.

4 Impulso específico positivo, i .

5 Fase positiva.

6 Duración t .

7 Impulso específico negativo.

8 Fase negativa.

9 Tiempo tras la explosión.

$P(t)$ = Presión por encima de la presión ambiente, en tiempo t .

P_c = Clasificación de la presión máxima.

$P_{máx}$ = Presión máxima derivada de los valores de ensayo medidos.

$i+c$ = Clasificación de la fase positiva del impulso específico.

$i+$ = Impulso específico de la fase positiva, calculado a partir de valores de ensayo medidos.

$t+c$ = Clasificación de la duración de la fase positiva.

$t+$ = Duración de la fase positiva, derivada de los valores de ensayo medidos.

$t\Delta c$ = Duración triangular calculada a partir de los valores de clasificación de P_c e $i+c$.

$t\Delta$ = Duración triangular calculada a partir de $P_{máx}$ e $i+$.

La figura 2.3.8.1 representa la evolución de una onda de presión, generada por la liberación de una energía (E_0). Esta onda de presión produce tras ella el desplazamiento del aire a gran velocidad. En la zona de sobrepresión o impulso positivo, la onda de presión genera que la materia, emigre del foco explosivo; en la zona de depresión o succión, la materia regresa hacia el foco.

Los puntos de mayor presión viajan a mayor velocidad que los que están a menor presión, lo que se traduce en la formación de un choque en la cabeza de la onda. Por otro lado, como consecuencia del incremento de entropía del medio sometido al choque, la energía se disipa e inevitablemente el frente de onda pierde presión y velocidad hasta convertirse en una onda sónica.

Antes de la llegada del frente de la onda de choque, la presión existente es la presión ambiental atmosférica P_0 , en el instante en que se produce la explosión, el efecto principal es el aumento brusco de la presión, desde la presión atmosférica (P_0), hasta que alcanza un valor máximo, que también se conoce como pico de presión o sobrepresión estática. (P_{max} ó P_s .)

En el tiempo de llegada t_a de la onda de choque, la presión sube abruptamente (discontinua en una onda ideal) hasta un valor $P_s + P_0$. A partir de ese momento la presión decae hasta alcanzar la presión ambiental P_0 en un tiempo $(t_a) + (t_+)$.

El tiempo (t_+) en el que la presión es superior a la atmosférica se conoce como fase positiva.

Después de la fase positiva, suele seguir un descenso de la presión (P_-) por debajo de la presión atmosférica. Se conoce esta fase como fase negativa o de succión. Esta fase es de menor magnitud y mayor duración que la fase positiva. A efectos de cálculos esta fase es despreciable, puesto que su valor absoluto es muy inferior al de la fase positiva. Aunque en el caso de la explosión de nubes de vapor se puede originar valores de la fase negativa sumamente elevados que ocasionen, daños por succión, muy importantes.

Cada tipo de explosión, tiene una curva característica como se ha visto anteriormente.

Las explosiones detonantes, como la que se representa en la Fig. 2.3.5.3.2.1 tienen un perfil de onda, de tipo pico, donde se alcanza la presión máxima (P_{max}), de forma muy rápida. La fase negativa de una explosión detonante es mucho mayor que las de las explosiones deflagrantes.

Como se ha visto, el impulso es una de las variables primarias representativas de las explosiones.

El impulso mecánico ejercido por la onda, está representado por el área bajo la curva en el periodo de tiempo t_p es decir, mientras dura la fase positiva de la explosión.

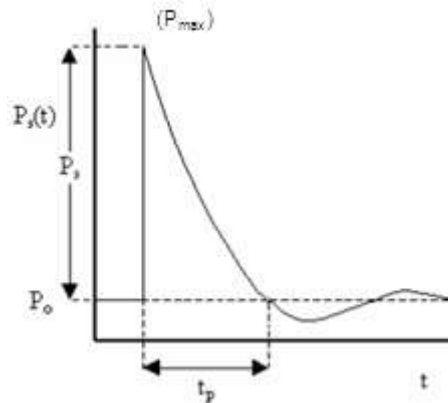
El impulso (i) se define según la expresión:

$$i = \int_0^{t_p} P_s(t) dt \quad \text{Ecuación 2.3.8.1}$$

El valor del impulso se puede simplificar si se toma como un triángulo el área bajo la curva, tomando como base del triángulo la duración de la fase positiva y como altura el pico de sobrepresión, con lo que la expresión queda reducida a:

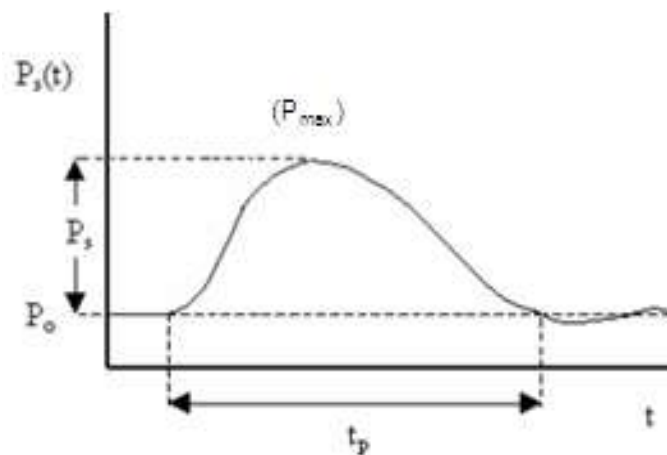
$$i = \frac{1}{2} P_s t_p$$

Ecuación 2.3.8.2



- Fig.2.3.8.2 Evolución de la onda de presión de una explosión detonante.

Las explosiones deflagrantes, como la que se representa en la figura 2.3.8.3 presentan como se puede observar, un frente de onda mucho más suave, que evoluciona de forma más lenta. La duración de la fase negativa en una explosión deflagrante, es mucho menor que la de las explosiones detonantes.



- Fig. 2.3.8.3 Representación de la evolución de la onda de una explosión deflagrante.

Otros parámetros de importancia, dentro de las características de la onda de presión, son:

- La presión dinámica (Q)

La presión dinámica se manifiesta por un efecto llamado de viento, que arrastra y derriba los obstáculos desplazables. La presión dinámica (Q) tiene un valor definido por que es consecuencia del avance de la explosión, que provoca el derribo de obstáculos desplazables. Este efecto llamado viento de la explosión, ejerce una carga adicional sobre las estructuras o las superficies sobre las que incide

Su valor se puede expresar a través de la expresión:

$$Q = \frac{1}{2} \rho_s U^2 \quad \text{Ecuación 2.3.8.3}$$

Donde:

ρ_s = es la densidad del aire (Kg/cm³) a la presión máxima de la onda

U = velocidad de desplazamiento de la onda (m/s)

También se puede expresar mediante la ecuación siguiente en función de la presión Ps:

$$Q = \frac{5}{2} \cdot \frac{P_s^2}{7p_0 + P_s} \quad \text{Ecuación 2.3.8.4}$$

La Presión dinámica en una estructura es se calcula mediante la ecuación:

$$Q_D = C_D Q \quad \text{Ecuación 2.3.8.5}$$

Donde: C_D es el coeficiente llamado "arrastre" que depende de la forma de la estructura. El coeficiente $C_d = 1,05$ para una onda de choque perpendicular a la superficie de una estructura.

- Presión reflejada (P_r)

Si el frente de choque impacta sobre una superficie sólida, plana y rígida con un cierto ángulo ocurre una reflexión. Se da el nombre de sobrepresión reflejada (P_r) a la sobrepresión que se generaría en una estructura perpendicular a la dirección de propagación de la onda de choque

La velocidad de la onda reflejada será mayor que la de la onda de presión incidente, por lo que la onda reflejada llegará a alcanzar a la onda incidente.

La velocidad de desplazamiento (U) en (m/s), en el aire considerado éste como gas ideal es:

$$U = \sqrt{\frac{1,4 RT}{\mu_a}} \quad \text{Ecuación 2.3.8.6}$$

Donde:

U es la velocidad de desplazamiento de la onda en (m/s)

R la constante de los gases ideales

T temperatura en (°K)

μ_a masa molecular media (0,029 kg/mol)

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

$$U_r = C_0 \left(1 + \frac{6P_s}{7P_0}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 2.3.8.7}$$

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:

$$P_r = 2P_s + (\gamma_a + 1)Q \quad \text{Ecuación 2.3.8.8}$$

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

Teniendo en cuenta la ecuación 5.3 y el valor de $\gamma_a=1,4$, se obtiene:

$$P_r = \frac{8P_s^2 + 14P_sP_0}{P_s + 7P_0} \quad \text{Ecuación 2.3.8.9}$$

Si $P_s \ll P_0$, la ecuación se transforma en:

$$P_r \approx \frac{14P_sP_0}{7P_0} = 2P_s \quad \text{Ecuación 2.3.8.10}$$

O al contrario, si $P_s \gg P_0$, la ecuación 5.7 se convierte en:

$$P_r \approx \frac{8P_s^2}{P_s} = 8P_s \quad \text{Ecuación 2.3.8.11}$$

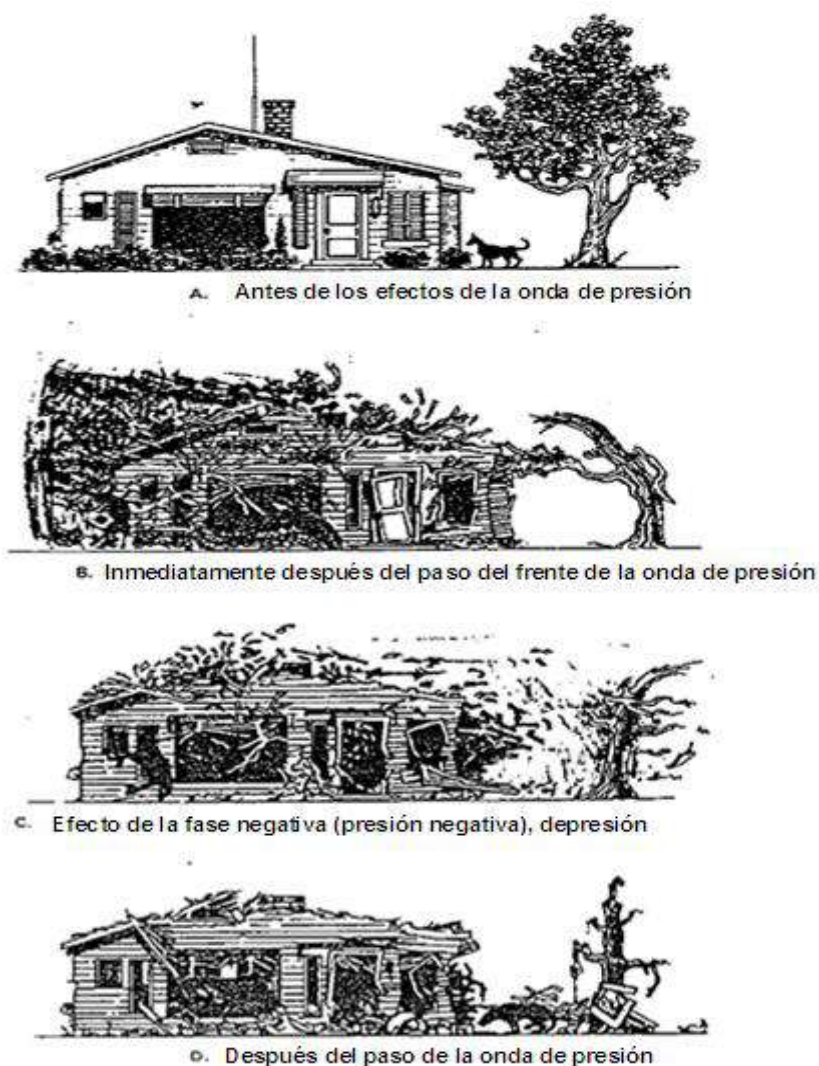
Así pues, la sobrepresión reflejada será siempre superior -de 2 a 8 veces- a la sobrepresión estática de la onda incidente.

El tiempo t_s de duración de la onda se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$t_s = \frac{3S}{U} \quad \text{Ecuación 2.3.8.12}$$

Por tanto, el frente de onda genera el desplazamiento de una masa central de aire y/o gases desde el centro de la explosión, a través del aire, generando una onda de presión positiva y otra posterior de succión. La fuerza explosiva ronda los 500 Km/h y los mayores daños se producen en una distancia crítica estimada en 6-7 metros. La onda de sobrepresión, la más dañina, suele durar 5 segundos, y la de succión 2 segundos, salvo en las explosiones atómicas (duración estimada de la onda de sobrepresión 1 minuto, y la de succión 10-15 minutos).

En la figura siguiente, figura 2.3.8.4 se observan los efectos de cada una de las fases de una onda de presión que se genera a una cierta distancia y acaba llegando a una construcción ligera.



- Fig. 2.3.8.4 Efectos de las fases de una frente de onda de presión sobre una construcción ligera.

La onda de presión se ve afectada por la interacción entre la explosión y la construcción, siendo la estructura un obstáculo, por lo que la onda de presión en su desplazamiento será perturbada. Esta perturbación será la carga sobre el obstáculo, que en este caso es la estructura.

2.3.9 Efectos de la onda de presión

De forma general, se deben de tener en cuenta los posibles efectos de un accidente, que dependiendo de las circunstancias y sustancias implicadas, puede ser un incendio o una explosión. En ambos casos intervienen diferentes factores, que dependiendo de las circunstancias, estos pueden ser, como se indica en la siguiente tabla:

	TIPO DE ACCIDENTE	EFFECTOS
Incendios	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bola de fuego ▪ Dardo de fuego ▪ Charco de fuego ▪ Flash 	Radiación térmica
Explosiones	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Explosión de vapor no confinada ▪ Explosión de vapor confinada ▪ BLEVE 	Radiación térmica Onda de presión Impacto de proyectiles
Escape sustancias tóxicas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nubes tóxicas de gases 	Efectos tóxicos sobre organismos

- Tabla 2.3.9.1 Efectos de diferentes accidentes.

En el caso de las explosiones, los factores que entran en juego y que hay que analizar para poder estimar las consecuencias son:

- Formación de llamas
- Radiación térmica.
- Energía liberada en el estallido.
- Onda de sobre presión.
- Fragmentos proyectados.
- Rotura del recipiente
- Proyección expansiva del vapor que puede arrastrar partículas de líquidos en forma de niebla.
- Emisiones peligrosas de sustancias.

Las consecuencias de lo anterior están ligadas a las siguientes variables:

- Las propiedades físicas y químicas de las sustancias inflamables.
- La cantidad y confinamiento de la atmósfera explosiva.
- La geometría de los alrededores.
- Resistencia de la envolvente y de las estructuras que la soportan.
- Los equipos de protección de que va provisto el personal expuesto al peligro.
- Las características físicas de las instalaciones amenazadas.

Conociendo una evaluación de las consecuencias, así como el alcance de las mismas, se puede:

- Establecer distancias de seguridad.
- Conocer y establecer los modos de protección.
- Tomar decisiones para realizar modificaciones en la instalación o proceso, para atenuar los riesgos.

El efecto principal de una explosión es la sobrepresión de la onda que se produce. Para poder estimar las consecuencias que tiene una explosión, hay que definir una serie de parámetros para poder caracterizar la onda de presión, que como se ha visto, al producirse la explosión sea del tipo detonante o deflagrante, se ponen en juego una serie de factores, que causaran una serie de efectos sobre todo aquello que se encuentra a su alrededor y en su radio de alcance.

2.3.9.1 Consecuencias de los accidentes

En el momento en el que se produce la explosión, la onda de presión generada, así como sus características básicas, sobrepresión e impulso, interaccionan con el ambiente que les rodea, desplazando y comprimiendo todo aquello que se encuentran a su paso, por lo que dependiendo de su posición respecto de la carga explosiva, de las dimensiones, forma, naturaleza y composición, se generan fuerzas y esfuerzos. Estos generan una serie de daños sobre las personas, los equipos instalaciones y estructuras. Estos daños son muy variables, pero los más importantes son los asociados a los puntos críticos del hombre, bien por su sensibilidad, bien por su peligrosidad.

Los efectos asociados a la onda de presión, pueden clasificarse como:

- a) Efectos primarios: los efectos primarios de la onda de presión, tienen su origen en las compresiones y expansiones del aire que puede producir fenómenos de deformación y fenómenos vibratorios, que afectan a las estructuras o edificios, a los equipos e instalaciones y a las personas.
- b) Efectos secundarios: estos tienen lugar cuando las deformaciones y tensiones dinámicas producidas superan las características de resistencia de las estructuras y estas se colapsan. El fallo, origina la formación de fragmentos que, debido al impulso de la onda de presión, actúan como proyectiles, cuyo impacto origina daños adicionales.
- c) Efectos terciarios: este tipo de daños, son los daños causados por la onda de presión al desplazar el cuerpo contra el suelo y provocarle el impacto contra otros objetos y estructuras.

2.3.9.2 Daños sobre las personas

La onda de presión generada tras una explosión, al incidir sobre las personas, debido a la gran cantidad de energía que se genera, ejerce una serie de efectos directos, que puede provocar un conjunto de lesiones, afectando a los órganos de las personas, fundamentalmente al tímpano y pulmón, pero además cabe destacar los posibles daños derivados del desplazamiento y colisión del cuerpo contra objetos o estructuras.

2.3.9.2.1 Gravedad de las lesiones

La gravedad de las lesiones, depende de los siguientes factores:

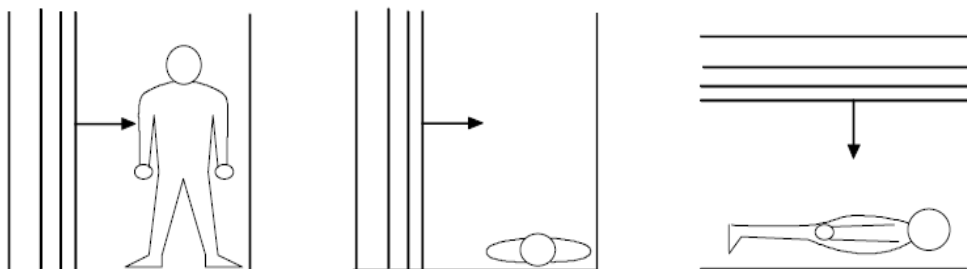
- Del lugar donde se produce la explosión, de tal forma que en los espacios abiertos tendremos una onda de sobrepresión, pero en zonas cerradas, la onda de presión choca y rebota, generando nuevas ondas de presión, con mayor grado de lesión.
- La gravedad de las lesiones, también depende de la distancia de la víctima al centro de la explosión.
- De la potencia de la onda expansiva y de la velocidad de propagación de la misma.
- La gravedad de las lesiones, depende también de las medidas de protección que se hayan adoptado, así como de sus coeficientes de absorción.
- De la resistencia del individuo.
- De la posición del individuo o de cómo incide sobre él la onda de presión.

Es muy importante considerar la posición de las personas y de las paredes de las estructuras respecto a la dirección de propagación de la onda de choque para calcular el efecto total, por lo que se pueden presentar los siguientes casos:

- El cuerpo se encuentra cerca de una superficie plana, perpendicular a la dirección de propagación de la onda de sobrepresión. Se produce una reflexión de la onda. El valor de la presión es el de la presión reflejada, cuyo valor es: $P=P_r$ siendo:

$$P_r = \frac{8P_s^2 + 14P_s \cdot 10^5}{P_s + 7 \cdot 10^5} \text{ (Pa)}$$

Ecuación 2.3.9.2.1.1



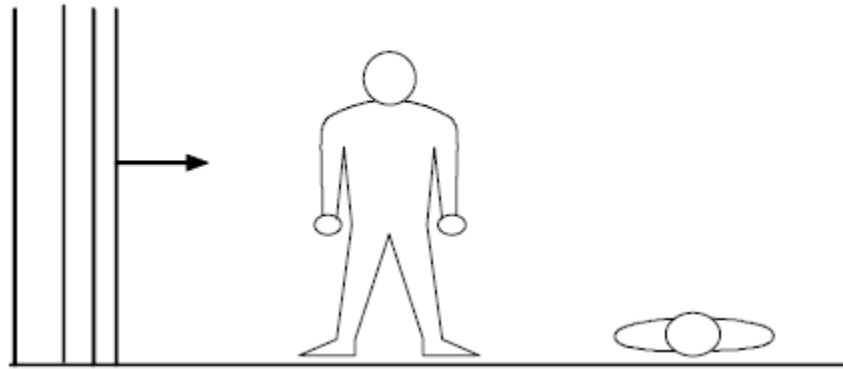
- Fig. 2.3.9.2.1.1 Cuerpo frente a superficie plana, con efecto de rebote.

- El cuerpo se encuentra perpendicular a la dirección de propagación de la onda, sin que se produzca efecto de reflexión de la onda, se manifiesta un efecto de arrastre y desplome. La sobrepresión total sería $P = P_s + Q$ siendo Q la presión dinámica recibida en forma de viento y cuyo valor es:

$$Q = \frac{5P_s^2}{2P_s + 14 \cdot 10^5} \text{ (Pa)}$$

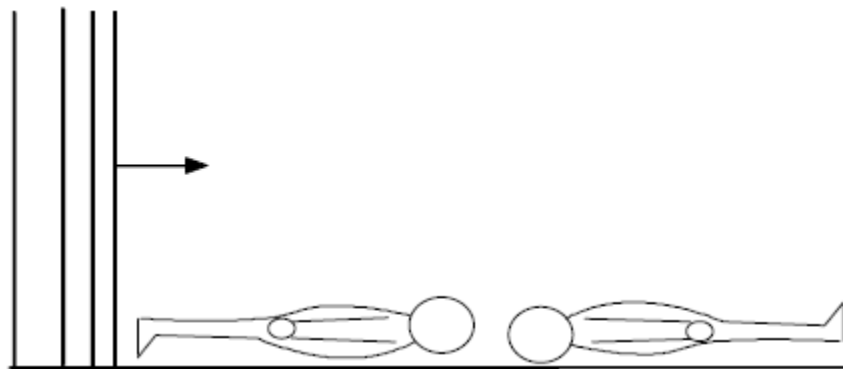
Ecuación 2.3.9.2.1.2

De esta manera el cuerpo ofrece la máxima resistencia a la onda.



- Fig. 2.3.9.2.1.2 Cuerpo frente a superficie plana sin efecto de rebote.

- El eje longitudinal del cuerpo es paralelo a la dirección de propagación de la onda de choque y equivale a que no haya obstrucción que perturbe a esa onda. En este caso la sobrepresión recibida sería $P = P_s$ (sobrepresión lateral o incidente máxima). De esta manera el cuerpo de la persona, ofrece la mínima resistencia a la onda.



- Fig. 2.3.9.2.1.3 Cuerpo que ofrece la mínima resistencia.

2.3.9.2.2 Tipos de lesiones por onda expansiva

Los tipos de lesiones producidas sobre las personas por el impacto de la onda expansiva se pueden clasificar en tres tipos:

- Lesiones primarias: son aquellas que se produce únicamente por el efecto directo de la onda de presión sobre el organismo.
- Lesiones secundarias: son producidas por el desplazamiento secundario de los proyectiles generados por la explosión, que golpean a la víctima. Estas lesiones pueden ser penetrantes o no.
- Lesiones terciarias: se generan por el desplazamiento del cuerpo y el consiguiente impacto de este contra objetos circundantes.

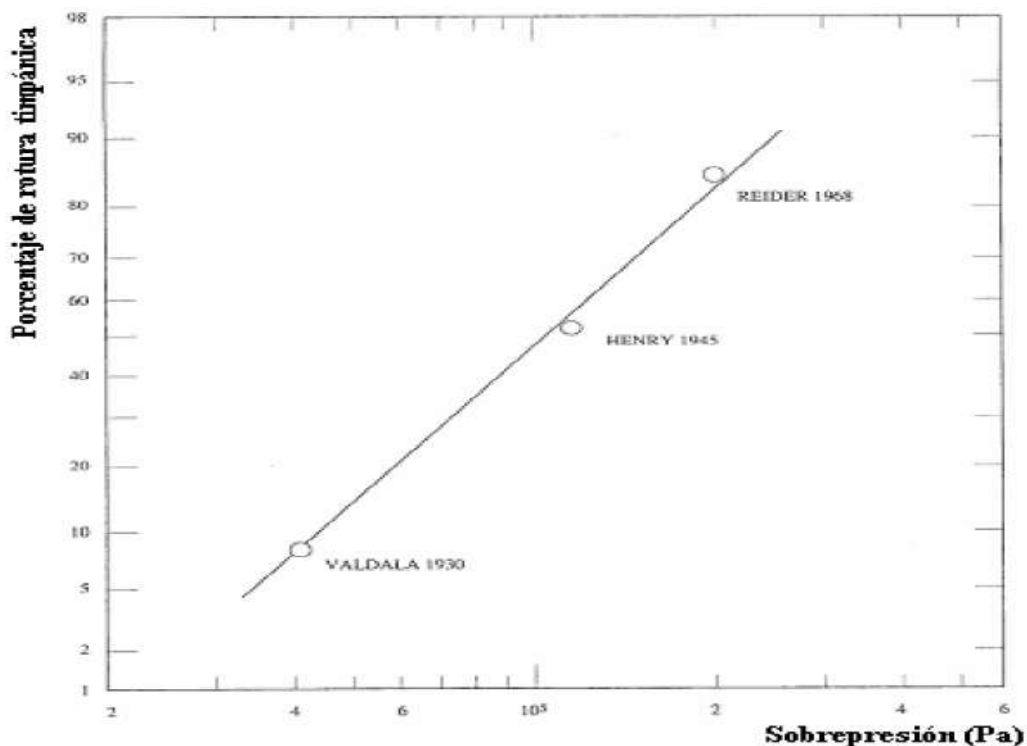
2.3.9.2.3 Tipos de daños sobre las personas

- Daños sobre las personas. Se consideran como principales, los siguientes.

a) Daños en el oído, rotura de tímpano.

El oído es un parte muy sensible del organismo frente a la sobrepresión impulso. Se sabe que la probabilidad de daño no depende de la duración de la fase positiva de la onda y por consiguiente, del impulso. Los daños producidos por ondas de larga y corta duración son similares.

Mediante la tabla siguiente, se calcula el tanto por ciento de rotura de tímpano en función de la sobre presión.



- Fig. 2.3.9.2.3.1 Representación del tanto por ciento de rotura del tímpano frente a la sobrepresión producida en una explosión.

b) Daños pulmonares, hemorragia pulmonar.

Los daños producidos al pulmón, dependen directamente de la sobrepresión y de la duración de la fase positiva de la onda y, por consiguiente, del impulso.

Los diferentes tipos de lesiones pulmonares que se pueden producir son:

- Hemorragias intrapulmonares.
- Contusiones pulmonares.
- Estallidos alveolares que provocan embolias gaseosas cerebrales y coronarias.
- Neumotórax.

c) Desplazamiento del cuerpo

La sobrepresión puede provocar que el cuerpo sea desplazado y posteriormente colisione contra el suelo o contra algún obstáculo, objeto o estructura, (paredes, equipos, etc.), evidentemente, en este choque pueden producirse daños incluso de mayor gravedad que los originados inicialmente.

Se pueden dividir estos en:

- Daños por impactos en la cabeza.

Según la velocidad del impacto, se pueden producir daños en la cabeza. En la siguiente tabla se establece la relación entre la velocidad del impacto y el criterio de daño.

Velocidad de impacto (m/s)	Criterio
3	Seguro
4	Umbral
5,5	50%
7	100%

- Tabla 2.3.9.2.3.1 Daños por impacto en la cabeza

- Daños por impactos del cuerpo.

Respecto de los daños ocasionados por la colisión de todo el cuerpo contra un obstáculo, se establece en la siguiente tabla, la relación entre la mortalidad por impacto y la velocidad de este.

Velocidad de impacto (m/s)	Criterio
3	Seguro
6,5	Umbral
16,5	50%
42	100%

- Tabla 2.3.9.2.3.2 Daños por impacto en el cuerpo

d) Daños por impactos.

Las consecuencias de los impactos de los fragmentos contra el cuerpo, que como se ha visto, pueden ser de tipo primario, originados por la propia rotura del recipiente y pertenecen al mismo, o secundarios, que son aquellos que están originados por las ondas de presión al actuar sobre todo aquello que encuentra a su paso, consecuencia del efecto dominó. Los fragmentos, también pueden ser de tipo penetrante o de tipo no penetrante, que solo golpean.

La sobre presión establece un impulso que arrastra los objetos

Se establece la siguiente relación entre el impacto de objetos no penetrantes de 4,5 Kg de peso que impactan contra la cabeza o la columna vertebral y la velocidad del impacto.

Velocidad de impacto (m/s)	Criterio
3	Umbral de seguridad
4,5	Daño probable
7	Daño seguro

- Tabla 2.3.9.2.3.3 Daños por impacto

Además, los fragmentos con una energía cinética a partir de 40 ó 60 J pueden ocasionar lesiones graves.

Relación entre objetos penetrantes de vidrio de 10 g y la velocidad de impacto.

Velocidad de impacto (m/s)	Criterio
15	Umbral para heridas en la piel
30	Umbral para heridas graves
55	Heridas graves 50%
90	Heridas graves 100%

- Tabla 2.3.9.2.3.4 Daños por impactos de objetos de vidrio

e) Radiación térmica.

Las consecuencias de la radiación térmica sobre las personas, son las quemaduras. Cuya gravedad depende de la intensidad de la radiación (Kw/m^2), así como de la dosis recibida. Según sea la profundidad de las quemaduras, estas se clasifican en: quemaduras de primer grado, quemaduras de segundo grado, o quemaduras de tercer grado.

En función de la radiación térmica, se establecen los siguientes niveles de daño para diferentes flujos térmicos.

Radiación térmica KW/m^2	Efecto
1,4	Se considera inofensivo para las personas sin ningún tipo de protección especial.
1,7	Mínimo necesario para causar dolor.
2,1	Mínimo necesario para causar dolor después de 1 minuto.
4,0	Suficiente para causar dolor con una exposición de 20 s. Quemaduras de primer grado. Radiación máxima tolerable para personas sin protección
4,7	Causa dolor en 15 a 20 s. Heridas después de 30 s Radiación máxima tolerable por personas protegidas,(bomberos).
11,7	El acero delgado, aislado parcialmente, puede perder su integridad mecánica.
12,7	La madera puede prender después de una larga exposición. Las protecciones termoplásticas de los cables eléctricos se funden.
25,0	El acero delgado aislado puede perder su integridad mecánica
37,5	Suficiente para causar daños a equipos de proceso, colapso de estructuras
60	Radiación máxima tolerable del cemento
200	Radiación máxima tolerable del hormigón armado
30 – 300	Radiación máxima tolerable del vidrio
400	Radiación máxima tolerable de pared de ladrillo

- Tabla 2.3.9.2.3.4 Efectos de la radiación térmica.

Kw/m^2	Tiempo de exposición umbral de dolor (s)
1,00	Día soleado
1,74	60
2,33	40
2,90	20
4,73	16
6,94	9
19,87	2

- Tabla 2.3.9.2.3.5 Tiempo de umbral de dolor frente a radiación térmica

La radiación térmica puede calentar notablemente el aire circundante y ello puede producir efectos en las personas. La siguiente tabla establece las consecuencias de la exposición de las personas al aire caliente.

Temperatura en °C	Respuesta fisiológica
125	Bastantes dificultades para respirar
140	Tolerable durante 5 minutos
150	Temperatura límite para escapar
160	Dolor rápido insoportable, piel seca
180	Heridas irreversibles en 30 s
205	Menos de 4 minutos de tiempo de tolerancia del sistema respiratorio, con la piel mojada

- Tabla 2.3.9.2.3.6 Efectos de la temperatura del aire sobre las personas.

2.3.9.3 Respuesta de las estructuras

Respuesta de las estructuras antes los efectos de la onda de choque.

De los diferentes métodos para determinar la respuesta de los equipos y las estructuras e incluso de las personas frente a una explosión, se suelen utilizar tablas obtenidas con datos históricos. Es uno de los métodos más utilizados para poder tener una idea de la magnitud de las consecuencias derivadas de una explosión

Los daños ocasionados por las ondas sobre las edificaciones y estructuras dependen de la sobrepresión, del impulso y de la formación de proyectiles. Al igual que en los humanos, la orientación respecto a la dirección de avance de la onda de presión, influye en el nivel de gravedad de los daños, así como la geometría de la estructura (relación altura / longitud) y los materiales de construcción, confinamiento, estado de la estructura (edificio nuevo o viejo, existencia de grietas), etc

Por tanto, las dos consideraciones principales en la evaluación de los efectos de una onda de choque sobre una estructura son:

- Predecir el incremento de presión de una explosión
- Estimar la respuesta de la estructura, y el daño que se produce en ellas.

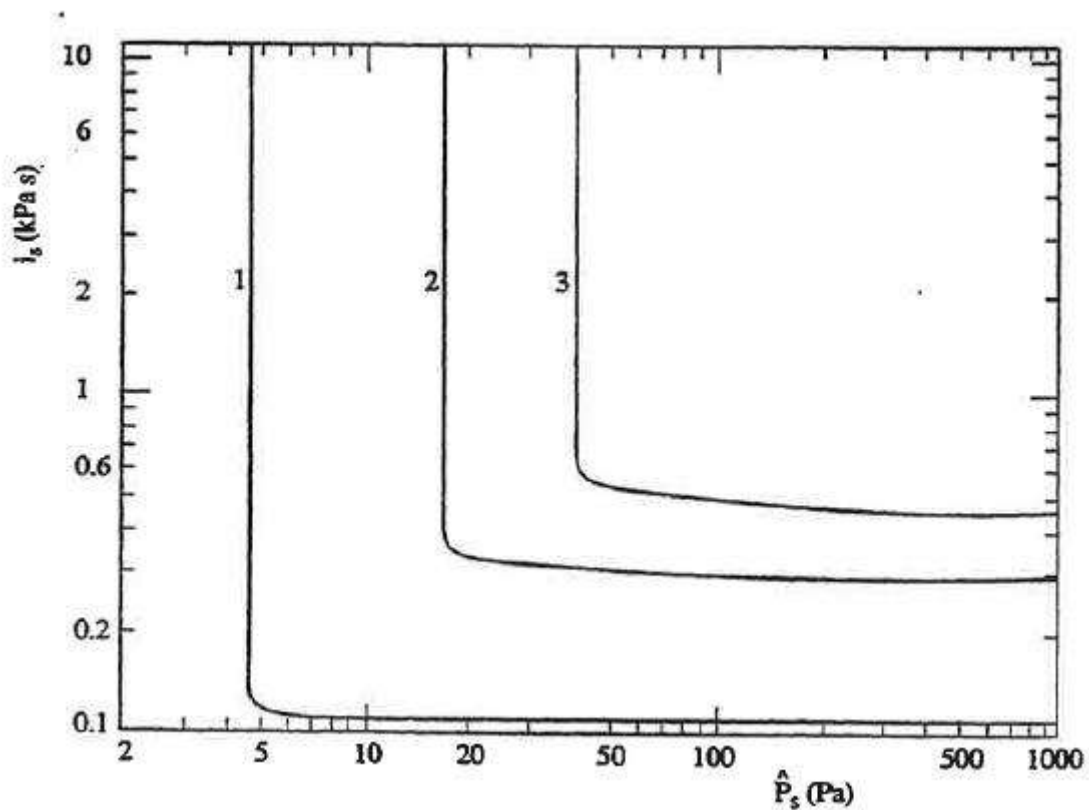
2.3.9.3.1 Nivel de Daño

Los datos expuestos en las siguientes tablas, son datos de carácter general y no deben de utilizarse como valores exactos, sólo nos dan un indicativo del nivel de daño que se puede alcanzar. Estos datos se basan en las diferentes experiencias y las fuentes son diversas, por ejemplo datos militares con explosivos como el TNT o explosiones nucleares. Los niveles de daño de las estructuras, se basan en los datos de la sobre presión y el impulso, que se obtienen de los calculo con lo diferentes métodos previstos.

La siguiente tabla, clasifica los daños estructurales en importantes y menores. A continuación se relacionan y clasifican distintos tipos de daños.

Daños estructurales importantes	Daños estructurales menores:
Techumbre parcial o totalmente destruida	Cielos rasos cuarteados.
Al menos un muro exterior dañado gravemente	Roturas de ventanas de vidrio.
Elementos portantes de carga o tabiques destruidos.	Juntas o uniones torcidas
Daños no reparables.	Tabiques o mamparas desencajados.
	Rotura de algunas jácenas, viguetas y montantes
	Daños reparables.

- Tabla 2.3.9.3.1.1 Clasificación de daños estructurales.



- Fig. 2.3.9.3.1.1 Líneas de isoriesgo

Las líneas de isoriesgo que se muestran en la figura 2.3.9.3.1.1, muestran los niveles de daño a los edificios frente a la presión de pico y el impulso de la onda expansiva de explosivos de alta potencia (TNT). Estas líneas de isoriesgo se pueden aplicar a edificios ligeros.

El nivel 1 corresponde a daños estructurales menores

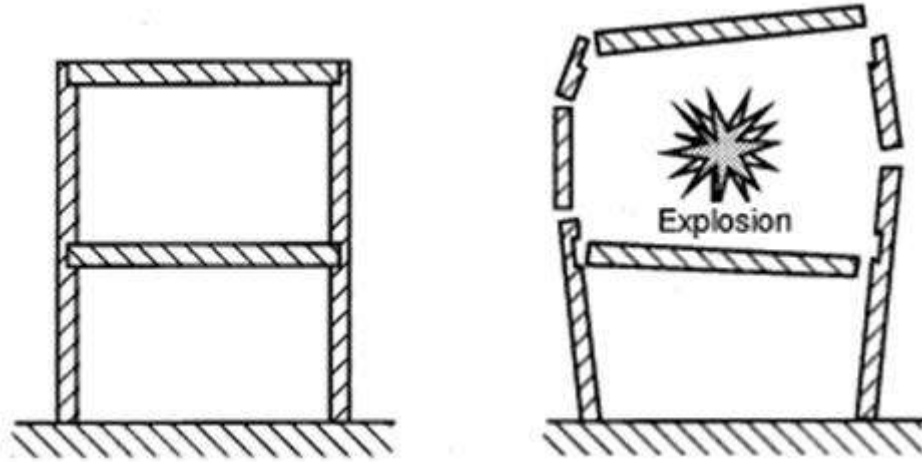
El nivel 2 corresponde a daños estructurales serios

El nivel 3 corresponde a la demolición parcial de entre el 50 y 75 % de las paredes.

Un aspecto importante de los daños que se producen a los edificios es poder evaluar si estos resisten la explosión, es decir, verificar su integridad.

El daño a un edificio en caso de una explosión de gas accidental no es un problema grave, siempre y cuando el edificio no se colapse o se generen fragmentos peligrosos. Esto es igualmente importante para los edificios sometidos a cargas de explosión desde el exterior, así como edificios que sufren explosiones internas.

La siguiente figura muestra el diseño de un edificio donde una explosión interna hará que el edificio se derrumbe.



- Fig. 2.3.9.3.1.2 Muestra la explosión en el interior de una estructura que se destruye.

En el caso de una explosión interna, las paredes y techos se desintegrarán y se formarán fragmentos peligrosos. Las viviendas, pueden llegar a ser destruidas por efecto de la sobrepresión de una onda de presión.

La tabla siguiente, tabla 2.3.9.3.1.2 establece valores aproximados que relacionan los daños estructurales con la sobrepresión máxima.

Daños estructurales	Sobrepresión (bar)
Destrucción total	1,00 a 2,00
Demolición total	0,80
Destrucción de maquinaria pesada, 3500 kg. Destrucción total de edificios	0,68 a 0,70
Destrucción completa de viviendas	0,48
Vuelco de vagones de tren	0,43
Daños irrecuperables	0,40
Postes de madera como los de teléfono arrancados	0,34
Daños menores en maquinaria pesada, 1500 kg. Estructuras de acero arrancadas. Cemento roto de edificaciones ligeras	0,27
Rotura de tanques de almacenamiento de crudo	0,23
Daños estructurales importantes	0,18
Destrucción casas de ladrillo en un 50%	0,17
Daños graves reparables	0,15
Destrucción parcial de muros	0,14
Colapso de tejados y paredes	0,13
Distorsión de vigas de acero	0,09
Daños estructurales menores	0,028 a 0,050
Cristales rotos y bastidores de ventanas	0,069
Destrucción de estructuras de madera	0,068
Cristales rotos en un 90%	0,040
Cristales rotos en un 50%	0,010
Cristales grandes rotos	0,0021
Rotura de vidrios por causa del ruido	0,0028
Rotura de pequeñas ventanas	0,0069

- Tabla 2.3.9.3.1.2 Relación de daños estructurales con la sobrepresión

La tabla siguiente, tabla 2.3.9.3.1.3, establece valores aproximados que relacionan los daños a las personas con la sobrepresión máxima.

Daños Personales	Sobrepresión (bar)
Mortandad del 99%	5,00
Mortandad del 50 %	4,06
Mortandad del 1 %	3,29
Umbral de muerte por lesiones de pulmón	0,70
Umbral de rotura de tímpano	0,35
Umbral de la zona de intervención	0,125
Umbral de zona de alerta	0,050
Ruido fuerte (143dB)	0,0028
Ruido molesto (137dB)	0,014

Tabla 2.3.9.3.1.3 Relación de daños a las personas con la sobre presión.

En la tabla 2.3.9.3.1.4, se muestran los efectos que determinadas combinaciones sobrepresión-impulso provocan sobre edificaciones.

Porcentaje de daño	Descripción de daño	Sobrepresión (bar)	Impulso (bar-s)
80 %	Parcialmente demolido	0,350	0,128
40 %	Daño severo. Demolición	0,345	0,121
25 %	Daño moderado. Reparable	0,276	0,112
		0,186	0,023
10 %	Daño leve. Reparable	0,180	0,079
		0,131	0,058
		0,124	0,062
		0,117	0,058
		0,110	0,011
		0,090	0,032

- Tabla 2.3.9.3.1.3.4 Relación de la sobrepresión impulso con el porcentaje de daño.

2.3.9.4 Sobrepresión impulso y fragmentos proyectados

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

Dentro de la capacidad destructiva de los fragmentos, entran en juego factores como: su trayectoria, alcance, velocidad, y efecto dominó, ya que pueden destruir otros equipos a presión, instalaciones 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).

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, producen pocos fragmentos de gran tamaño, con un elevado potencial para producir daños. Las fracturas frágiles producen fragmentos de menor tamaño.

El número de fragmentos generados en una explosión se analiza en el Anexo IV

2.3.10 Métodos de cálculo

La sobrepresión y el impulso asociados a las ondas de presión generadas en las explosiones, son las principales variables a tener en cuenta, para poder determinar los daños ocasionados por las explosiones.

Como se ha visto hasta ahora, en una explosión entran en juego diversos factores: fluido, recipiente, entorno, etc.

Para poder realizar una estimación de los efectos de una explosión, es necesario tener algún índice comparativo, por ello existen varios métodos en función de las sustancias que entran en juego, del tipo de ambiente en el que se produce la explosión, así como los condicionantes ambientes que la rodean y el entorno.

Existen varios métodos de cálculo o modelos para describir los efectos de una explosión, los cuales presentan diferencias entre ellos. Dependiendo del tipo de explosión, así como de los productos que intervengan, nos podemos encontrar con los métodos de cálculo que se exponen en la siguiente tabla.

Tipo de explosión	Método de calculo
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Detonación de sustancias explosivas 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ TNT Equivalente
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Explosión de nubes de vapor 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Métodos basados en el TNT ▪ Métodos basados en relaciones características de las explosiones ▪ Métodos fluidodinámicos ▪ Método multienergía ▪ Otros métodos
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estallido de recipientes 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Los basados en la fluidodinámica ▪ TNT equivalente ▪ Baker
<ul style="list-style-type: none"> ▪ BLEVE 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ TNT
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dispersión nubes tóxicas o inflamables 	

- Tabla 2.3.10.1 Diferentes métodos de cálculo.

Como se puede observar, hay diferentes tipos de cálculo, dependiendo del tipo de sustancia y de las condiciones, los tres modelos de cálculo más utilizados para estudiar y describir los efectos de una explosión son: Método del TNT equivalente, método multienergía, y método Baker.

A continuación se describe brevemente cada uno de ellos, que son analizados con más detalle en los anexos I, II, y III, respectivamente.

2.3.10.1 Método del TNT equivalente

Los militares han estado siempre ampliamente interesados en el poder destructivo de los explosivos. En consecuencia, la relación entre el daño y los explosivos de gran potencia, se ha estudiado durante mucho tiempo.

Las sustancias explosivas se encuentran definidas en el artículo 10 del Real Decreto 230/1998 de 16 de febrero por el que se aprueba el Reglamento de Explosivos. Entendiendo por material explosivo, aquellas materias sólidas o líquidas (o mezcla de materias) que por reacción química puedan emitir gases a temperatura, presión y velocidad tales que puedan originar efectos físicos que afecten a su entorno.

Las materias y objetos explosivos definidos anteriormente se corresponden con las que figuran en la clase I de las «Recomendaciones relativas al transporte de mercancías peligrosas» de las Naciones Unidas.

Asimismo, el Artículo 12 del RD 230/1998, establece la clasificación de los explosivos en función de su composición y aplicación.

Materias explosivas

- Explosivos iniciadores
- Explosivos rompedores.
- Sustancias explosivas.
- Mezclas explosivas.

Dentro de las mezclas explosivas existe una amplia clasificación, entre las que podemos destacar a los explosivos de tipo A (dinamitas).

El TNT es un explosivo convencional muy utilizado y los efectos provocados han sido también 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.

Bajo determinadas condiciones, las reacciones de los explosivos, y las reacciones de las diferentes sustancias al explotar como pueden ser el TNT y el nitrato de amonio, son similares. Es por ello que se establece una relación que nos 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

El método del TNT equivalente permite calcular los efectos de cualquier sustancia explosiva por comparación, cuantificando la fuente u origen de la explosión, como una cantidad equivalente a la energía que liberaría una cantidad equivalente de TNT, que produciría los mismos efectos.

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).

Por tanto las características principales del método del TNT equivalente son:

- El método del TNT equivalente, compara la energía liberada en una explosión con los efectos equivalentes del TNT.
- Es aplicable a sustancias explosivas o muy inestables.
- El TNT da lugar a explosiones detonantes, cuyo perfil difiere considerablemente de las deflagrantes, que son las que suelen originar las nubes de vapor.

Lo que provoca notables desviaciones de la sobrepresión e impulso.

- Se desaconseja la utilización del método del TNT equivalente, en el caso del estallido de recipientes, debido a la incertidumbre del factor de eficiencia.

2.3.10.2 Método de Multienergía

El método multienergía 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

Determinación de la energía de la explosión 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.

2.3.10.3 Método de Baker

El método BAKER, consiste en una combinación del método multienergía y las curvas de explosión de Strehlow de 1979, con el cálculo de las sobre presión y el impulso máximo.

El método de Baker, 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 proceso) y, a partir de ésta, la energía de la explosión (E_{exp} , J).
- 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
- Obtención de la sobrepresión escalada (P' , adimensional) e impulso escalado (i' , adimensional) a partir de las relaciones con la “distancia escalada”.
- Obtención de la sobrepresión escalada (P' , adimensional) e impulso escalado (i' , adimensional) a partir de las relaciones con la “distancia escalada”.
- Corrección de la presión y distancia escaladas (P' e i') en función de la geometría del recipiente y de su ubicación (elevado o cerca del suelo).
- Transformación de la sobrepresión escalada y del impulso escalado corregidos en la sobrepresión (P_s , P_a) e impulso mecánico de la onda (i , $Pa \cdot s$)

2.4 Análisis de soluciones

2.4.1 Reducción del riesgo

Lo ideal sería evitar la formación de cualquier tipo de riesgo, adoptando las medidas oportunas de prevención, pero en ocasiones es imposible la eliminación total del riesgo, por lo que es necesario combinar las siguientes acciones:

a) Prevención:

Se busca evitar la explosión, adoptando las siguientes medidas preventivas:

- Evitar la formación de atmosferas explosivas.
- Evitar cualquier tipo de fuente de ignición.

b) Protección:

En este caso se busca limitar o atenuar los efectos de las explosiones a un nivel aceptable mediante la protección de la propia construcción. En este caso se acepta que se haya producido la explosión.

Dichas medidas son:

- Construcción resistente a la explosión. La construcción debe de ser tal que pueda resistir una explosión sin romperse, construyendo las paredes del lugar lo suficientemente resistentes a las presiones que se puedan generar.
- Descarga de la explosión. La descarga de la explosión es un principio de protección que conduce a reducir la presión de explosión mediante la descarga de la mezcla o del gas. Los modos de conseguir esto son:
 - Disponiendo de aberturas suficientes para evitar la destrucción de los aparatos, sistemas de protección y componentes.
 - Estableciendo superficies controladas en la envolvente del recinto, en el que determinadas zonas son más débiles que el resto.
 - Instalación de aliviaderos que se accionen abriéndose al espacio.
 - Instalando discos de rotura, válvulas de explosión y paneles o aliviaderos, que se pueden utilizar como dispositivos de descarga.

La superficie de descarga necesaria de un sistema depende principalmente de:

- Resistencia del recipiente.
 - Violencia de la explosión (presión máxima que se alcanza y su velocidad)
 - Presión de actuación del dispositivo de descarga.
-
- La supresión de la explosión. En el caso de gases, los sistemas de supresión de la explosión impiden que la explosión alcance su presión máxima de explosión debido a la inyección rápida de agentes extintores en el equipo, sistema de protección o componente, en caso de explosión. Esto significa que los aparatos y componentes

protegidos de esta manera se pueden diseñar para resistir una presión de explosión reducida.

- La prevención de la propagación de la llama y de la explosión. Se emplean dispositivos antiretorno, barreras extintoras.
- Volumen y geometría del recipiente o volumen a proteger.
- Dimensiones de los conductos que prolongan las descargas hacia el exterior.

2.4.2 Medidas preventivas

Para proteger las instalaciones de los efectos destructivos que causan las explosiones, se dispone de dispositivos limitadores de la presión desarrollada.

Existen diferentes métodos para no sobrepasar la presión, ello se consigue con la utilización de: discos de ruptura, válvulas de seguridad, y aliviaderos de presión. Todos ellos deben de ser tarados a una presión, por debajo de la presión de ruptura del recipiente.

Por sus especiales características y para el objeto de este proyecto se realiza una breve descripción de este último método.

2.4.2.1 Aliviaderos de explosión

En unos casos, se opta por instalar estos dispositivos, aplicando el principio de debilitamiento voluntario en ciertos puntos de la instalación, realizando aberturas y cerrándolas con membranas delgadas de metal, plástico u otros materiales, de menor resistencia que el resto del contorno.

En otros casos, se instalan clapets móviles o válvulas de resorte.

La presión de apertura o de alivio, siempre debe ser inferior a la máxima que resiste la estructura.

La abertura del aliviadero, permite a los productos de combustión, salir al exterior durante el desarrollo de la explosión. Asimismo, la presión máxima alcanzada puede ser reducida a valores inferiores a la de rotura del aparato, estructura o contenedor, siempre que el aliviadero esté convenientemente dimensionado.

Esta técnica es aplicable a cualquier volumen a proteger.

Hay que destacar que los productos, deben de ser evacuados en la dirección adecuada, hacia zonas que no representen un peligro adicional, ni para las personas ni los bienes o instalaciones.

Por ejemplo, los paneles de venteo, constituyen un equipo de alivio de presión, diseñado, para abrirse en un recipiente cerrado a una presión determinada. Su objetivo es proteger al sistema de presiones excesivas causadas por polvos o gas.

2.4.2.2 Sistemas de alivio y venteo

Los sistemas de alivio y venteo protegen las instalaciones durante las operaciones de funcionamiento normal de las instalaciones.

Es fundamental para la seguridad que la operación de descarga de estos dispositivos de seguridad se realice en condiciones seguras, y no se vea afectada por otros procesos. Esto es que durante el funcionamiento normal de los sistemas de alivio y venteo, no se produzcan otro tipo de situaciones peligrosas. Las figuras 2.4.2.2.1 y 2.4.2.2.2 muestran distintas opciones de sistemas de alivio.

2.4.2.3 Otras precauciones

- Control del tanto por ciento de llenado del equipo, para evitar que esté lleno de líquido al 100%, puesto que en el momento que se produzca la evaporación, la presión aumentará considerablemente y se puede producir la rotura del equipo.
- Protección de los equipos y recipientes contra impactos, mediante barreras físicas, que impidan que los equipos o recipientes sean alcanzados.
- Aislamiento térmico del recipiente, mediante materiales aislantes, tales como: fibra de vidrio, mallas metálicas, etc, con el objeto de retrasar el calentamiento.
- Diseño del cubeto de retención con la inclinación suficiente para alejar el líquido de las inmediaciones.

2.4.2.4 Protección de recintos

Al ser la onda de presión y los proyectiles, fenómenos propagativos, la protección mediante obstáculos de rigidez adecuada (muros resistentes, o estructuras tipo bunker) es efectiva.

Sin embargo, aun así pueden producirse daños ocasionados por las ondas reflejadas.

Una estructura expuesta a los efectos de la onda explosiva, considerará un dimensionamiento con un específico nivel de robustez. El término robustez, se entiende como la capacidad de la estructura para resistir un determinado nivel de explosión. El factor dominante de una onda explosiva es la magnitud de la energía liberada y las propiedades del medio donde se propaga. No es fácil correlacionar propiedades intrínsecas de los explosivos con su efecto sobre el medio, sin embargo puede afirmarse con una gran aproximación que los efectos en contacto (interacción foco-objeto) dependen de la presión de detonación y los efectos a distancia de la magnitud de energía liberada, lo cual hace que en la teoría de las ondas explosivas sea esta (E_0) el parámetro fundamental.

Se trata de evitar el colapso de las estructuras, edificios o recintos, por acción del fuego y de las explosiones. Los materiales utilizados usualmente en la construcción son el Hormigón, el acero y el ladrillo, por lo que protegiéndolos, tratamos de conseguir mantener sus propiedades mecánicas.

Como se veía anteriormente, una de las opciones es hacer que las paredes del recipiente o recinto sean lo suficientemente resistentes como para resistir la sobrepresión.

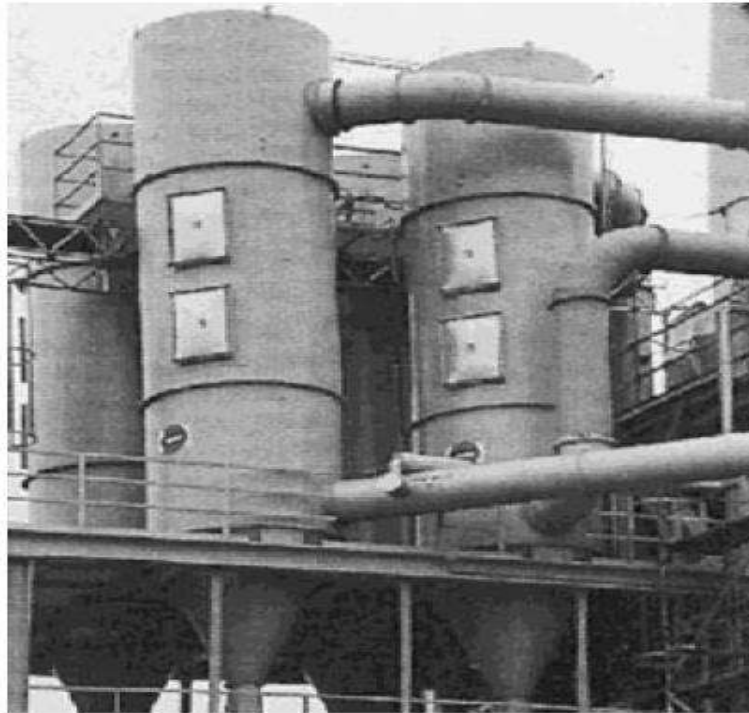
El criterio general de diseño es evitar que la presión dentro del recinto supere un cierto límite de rotura. Esto supone aceptar ciertas deformaciones.

En el caso de los almacenamientos de recipientes móviles, la ITC APQ 5, almacenamiento de botellas y botellones de gases comprimidos licuados y disueltos a presión, establece las medidas preventivas para los distintos tipos de almacenamiento desde el punto de vista de la protección contra incendios, puesto que se establece las cantidades máximas que se permite almacenar, con respecto a los tipos de productos, y se establece el tipo de RF (Resistencia al Fuego) de las estructuras.

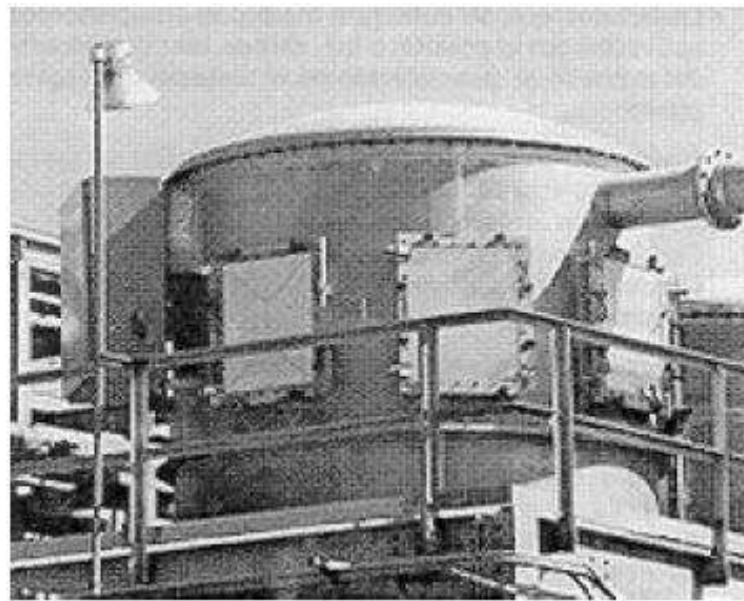
Pero desde el punto de vista de las explosiones simplemente se recomienda que las salas de almacenamiento dispongan de algún cerramiento ligero (paramentos débiles) orientado hacia el exterior o hacia otras zonas seguras, para permitir el alivio de la onda de presión en caso de deflagración o explosión.

Los citados paramentos débiles deberían instalarse siguiendo la proporción de 1 m^2 por cada 25 a 50 m^3 de volumen del recinto, según que la resistencia a la sobrepresión de las paredes delimitadoras del mismo sean respectivamente de baja resistencia (pared de panel prefabricado, etc...) o de gran resistencia (hormigón armado o similar) calculado para soportar sobrepresiones considerables.

A título orientativo la N. F. P.A. (National Fire Protection Association) de EE. UU, considera como pared de baja resistencia aquella cuya resistencia a la sobrepresión es inferior a $0,1 \text{ bar}$ y de gran resistencia aquella de resistencia a la sobrepresión superior a $0,1 \text{ bar}$.



- Fig. 2.4.2.2.1 Paneles de venteo, instalados en los laterales de los equipos



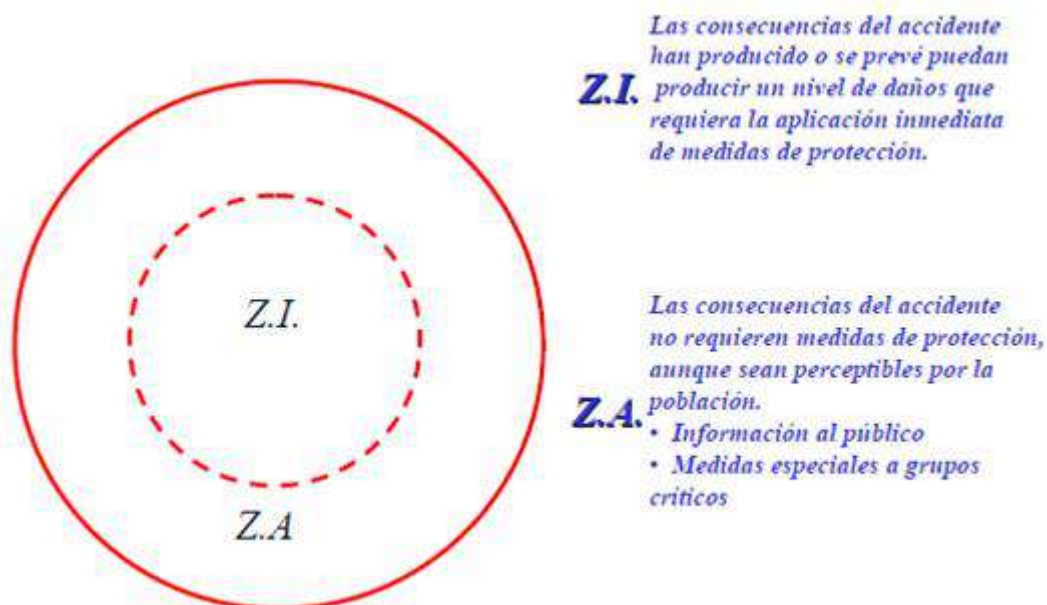
- Fig. 2.4.2.2.2 Paneles de venteo instalados en el lateral del equipo.

2.4.2.5 Prevención por distancia

El RD 1196/2003 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 intervengan sustancias peligrosas, establece dos zonas que tienen que ser objeto de planificación de prevención y adopción de medidas de protección contra los accidentes.

Así, se definen las siguientes zonas:

- a) Zona de intervención: es aquella en la que las consecuencias de los accidentes producen un nivel de daños que justifica la aplicación inmediata de medidas de protección.
- b) Zona de alerta: es aquella en la que las consecuencias de los accidentes provocan efectos que, aunque perceptibles, no justifican la intervención con medidas de protección, excepto en determinadas circunstancias en las que podrían resultar afectas personas especialmente sensibles, por lo que en la zona de Alerta no deben producirse daños significativos.



- Fig. 2.4.2.5.1 Representación de la zona de intervención y de la zona de alerta.

La directriz básica de protección civil, establece los valores mínimos de sobrepresión e impulso para poder delimitar estas zonas, que son los que se establecen en la siguiente tabla.

	Límite zona de intervención	Límite zona de alerta
Sobre presión (bar)	0.125	0,05
Impulso (bar·s)	1,5	0,1
Alcance de fragmentos (bar ·s)	95 % con impulso superior a 0,01	99% con impulso superior a 0,01

- Tabla 2.4.2.5.1 Límites de las zonas de intervención en función de la sobrepresión e impulso

Con estos valores de sobrepresión e impulso, se limitan las zonas, de acción de daño sobre los seres humanos, equipos, instalaciones y estructuras.

2.5 Requisitos de cálculo

2.5.1 Centros de recarga de equipos de respiración autónomos

Por sus especiales características, al igual que en otro tipo de recipientes de características similares, en los equipos de respiración autónomos, es inviable la protección del equipo mediante sistemas de alivio o reducción de presión, por lo que hay que tomar especiales precauciones para su utilización, almacenamiento, etc.

Los equipos de respiración autónomos, se encuentran ampliamente implantados en la industria, tanto marítima como terrestre, donde sus usos más destacados son:

- Equipos para respiración en espacios confinados, tanto en plantas petroquímicas, como en instalaciones offshore, como en el ámbito marítimo.
- Equipos de respiración para las unidades de intervención de extinción de incendio en cualquier tipo de industria, terrestre o marítima.
- Equipos de respiración para actividades subacuáticas, tanto de tipo profesional como deportivo.

Por tanto, los equipos de respiración autónomos, son de uso frecuente en refinerías de petróleo, parques de bomberos, centros de actividades sub-acuáticas (centros de buceo), etc.

Dentro del ámbito terrestre, su utilización e inspección, se encuentra regulado, por la ITC EP 05 del Reglamento de Equipos a Presión aprobado por el Real decreto 2060/2008.

Asimismo, las instalaciones de los centros de recarga de botellas a las que se refiere el Artículo 12 del capítulo IV de la ITC EP 05 del Reglamento de Equipos a Presión, se encuentran dentro del ámbito de aplicación de la Ley 21 de Industria, puesto que su actividad principal es el del envasado o embotellamiento de aire o mezcla de gases respirables, según las actividades a las que se refiere el Artículo 3 de la Ley 21 de Industria.

Según lo indicado en el artículo 2 de la ITC EP 05 del RD 2060/ 2008, se definen los siguientes términos:

- *“botella de equipo de respiración autónomo”, un recipiente de fácil manejo, que sirve para almacenar y transportar un fluido respirable, utilizado en actividades subacuáticas y en trabajos de superficie.*
- *“Centro de recarga de botellas” establecimiento autorizado que dispone de los medios adecuados para poder ejercer la actividad de recarga de botellas.*
- *“zona de recarga” recinto cerrado donde se realiza la recarga de las botellas y donde se encuentra la rampa de recarga y los latiguillos para conectar las botellas.*

Por otro lado, la versión 1.3 de la Guía de la Directiva de Equipos a Presión, establece que los equipos de respiración autónomos, están considerados como equipos a presión, y no se excluyen en base al artículo 1, sección 3.19, de la Directiva, puesto que se les considera equipos de protección personal, destinados a ser transportados individualmente.

Según lo indicado en el Artículo 12 del Capítulo IV de la ITC EP 05, emplazamiento de la zona de recarga, para el emplazamiento de la zona de recarga deberán cumplirse las siguientes condiciones:

- La zona de recarga no podrá tener paredes, techo o suelo comunes con otros locales o espacios habitados, a menos que se justifique en el proyecto que en los cerramientos se dispone de una protección adecuada que sea capaz de soportar el impacto, en caso de accidente, por desprendimiento o explosión de una botella o de alguno de sus componentes.
- La protección del emplazamiento, según el párrafo anterior, deberá justificarse.
- Las aberturas que comuniquen con otros locales y con el exterior (puertas y ventanas) deberán protegerse adecuadamente de forma que no puedan causarse daños a las personas, a las propiedades y a las cosas en caso de accidente, por impacto físico o por expansión del fluido.

Todo ello nos indica de los peligros que pueden surgir de la posible explosión de un recipiente o de un accidente dentro de la zona de recarga, pero no indica ninguna medida de seguridad, ni de prevención contra la posible explosión o de medidas de seguridad a adoptar, para mitigar el efecto de la misma.

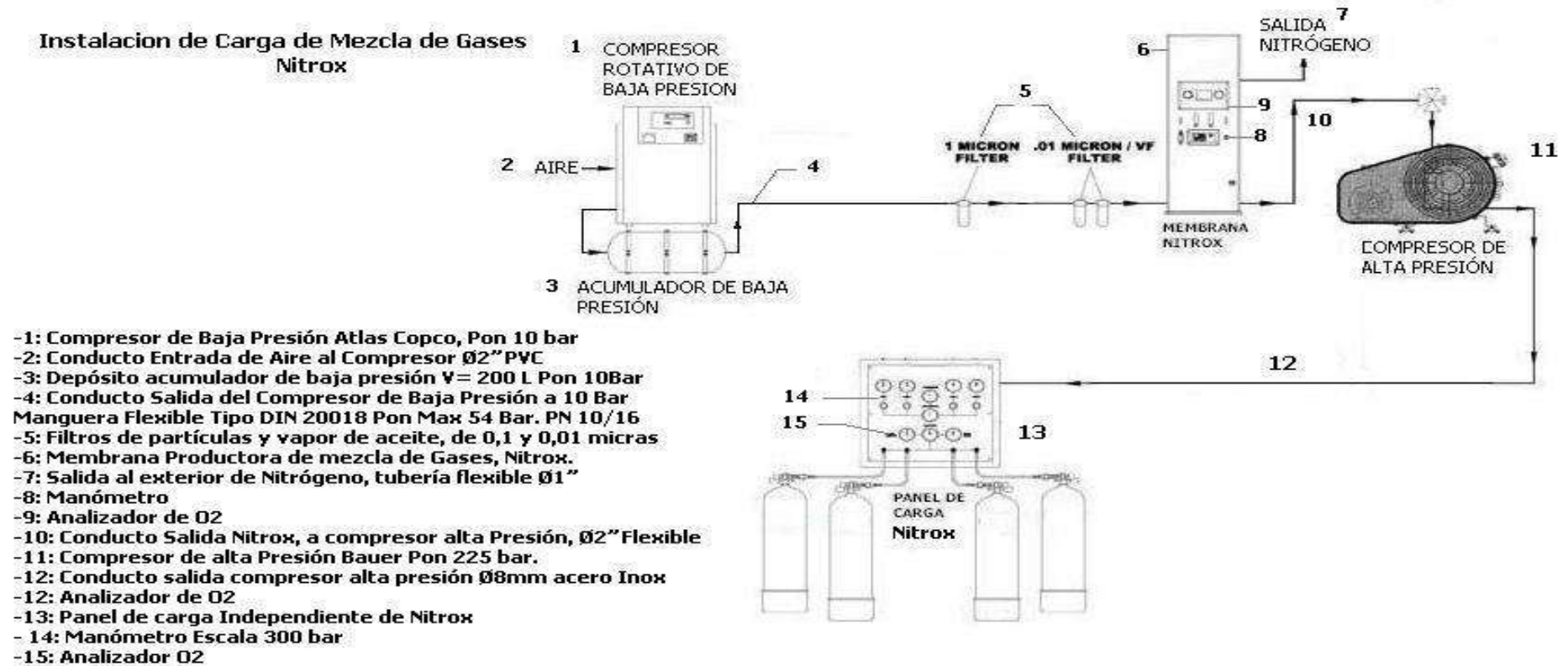
Es por ello que se trata de analizar el alcance de una posible explosión de uno de los elementos que forman una instalación y extrapolar esto a otro tipo de instalaciones.

Los equipos de respiración autónomos, ya sea de superficie o los utilizados en actividades subacuáticas, no están dotados de dispositivos de alivio o válvulas de seguridad, como otros recipientes a presión.

El resto de elementos que se encuentran en un instalación de un centro de recarga de botellas, si disponen de estos elementos de seguridad.

Por lo que la principal fuente de riesgo de explosión en un centro de recarga son los propios equipos de respiración autónomos. Estos equipos almacenan fluidos, generalmente aire en su interior, aunque pueden almacenar mezclas de gases, que comercialmente se denomina NITROX

La siguiente figura representa el esquema de una instalación típica de un centro de recarga, empleada para la carga de (mezcla respirable con un contenido de oxígeno O₂ superior al 21 % conocido comercialmente como Nitrox.



- Fig. 2.5.1.1 Esquema instalación típica de un centro de recarga



- Fig. 2.5.1.2 Imagen de dos centros de recarga, compresores y equipos de respiración autónomos.

Con el único objetivo de suministrar un aire respirable o una mezcla de gases respirable, y dotar al usuario de una autonomía razonable, el aire o las mezclas de gases se almacenan en los equipos de respiración autónomos, a unas presiones que varían entre los 200 y 300 Bar, dependiendo del tipo de equipo de respiración autónomo y su utilización.

Dentro de las instalaciones a presión de los centros de recarga, el uso de botellas y botellones es muy común, ya que con el objeto de facilitar la recarga de equipos, por el volumen de ellos que se utiliza, y con el objetivo de aumentar la rapidez de las operaciones, se pueden encontrar casos en los que las instalaciones cuentan con conjuntos de botellas, que se denominan rampas de almacenamiento, para lo cual se dispone de recipientes para almacenar el aire o la mezcla de gases respirables.

En la mayoría de los casos, se almacena aire en el interior de estos recipientes.

Actualmente se utilizan filtros de membranas para obtener las mezclas con oxígeno superior al 22%, pero en algunos casos, aún se siguen utilizando recipientes de oxígeno al 99% ,para realizar las mezclas.

Teniendo en cuenta su alto potencial de daño, se les debe de prestar una especial atención desde el punto de vista de la seguridad.



- Fig. 2.5.1.3 Rampa de almacenamiento de aire utilizada para la recarga de equipos de respiración.

Normalmente en las instalaciones de los centros de recarga no se almacenan productos corrosivos, inflamables o tóxicos, por lo que se piensa, que no se corre ningún riesgo.

Contrariamente a lo que se piensa, los equipos a presión e instalaciones de los centros de recarga, poseen un alto potencial destructor en caso de explosión, aun cuando “solo” se almacena aire. Por ello, las instalaciones de los centros de recarga, presentan un gran riesgo por explosión de recipientes a presión.

Como se ha visto estas explosiones pueden tener un origen mecánico (fallo en el material, etc) y tienen un gran poder destructivo.

Con el objetivo de poder reducir los riesgos de la explosiones de estos recipientes por este tipo de fallos, los equipos de respiración autónomos, reglamentariamente están sujetos a un estricto plan de inspecciones,, realizando una inspección visual de forma anual a partir del tercer año y una cada 3 años deben de someterse a un plan de pruebas y verificaciones tal como se especifica en la tabla siguiente, tabla 2.5.1.1, deben de seguirse las normas indicadas.

Tipo de equipo Material	Norma
Acero sin soldadura	UNE EN 1968
Aluminio	UNE EN 1802
Materiales compuestos	UNE EN ISO 11623

- Tabla 2.5.1.1 Relación de normas UNE aplicables a la inspección de equipos de respiración autónomos.

Estas normas establecen las condiciones de inspección y ensayos periódicos a los que están sujetos los equipos de respiración autónomos

La inspección interior de los equipos, la calidad del aire interior, (humedad, partículas de contaminantes como aceites u otros elementos).

El filtrado del aire o las mezclas que se introducen en el interior, ya que el aceite y el vapor de aceite, procedente del compresor, se puede introducir en las botellas.

En comparación con otros equipos a presión presentes en la industria, aunque los volúmenes que se almacenen individualmente son muy inferiores a cualquier otro proceso, las presiones que se manejan en los centros de recarga de equipos de respiración autónomos, son muy altas.

En la tabla siguiente, tabla 2.5.1.2, aparecen diferentes equipos con sus presiones de trabajo.

Equipo	Utilización	Presión servicio
Caldera	Proceso fabrica	8 bar
Caldera central vapor fabrica	Central vapor fabrica	80 bar
Equipo respiración autónomo	Respiración	200 bar
Calderín de aire	Suministro aire servicio a instalación	12 bar
Calderín de aire	Arranque motor	40 bar

- Tabla 2.5.1.2 Relación de presiones de diferentes tipos de equipos.

En otro tipo de instalaciones, se utilizan gases tales como:

Acetileno; Argón; Dióxido de Carbono; Helio; Hidrógeno; Hielo Seco; Kriptón / Neón / Xenón que también se suministran con las siguientes características:

Gas Contenido	Tipo*	Dimensiones (mm)		Presión Máx. (kg/cm ²)	Contenido de gas		Peso Botella Llena
		Altura	Diámetro		m ³	Kg	
O ₂ ; Ar	5L	570	140	200	1	-	10
O ₂ ; Ar	20L	900	204	200	4	-	35
O ₂ ; N ₂ ; Ar; Mezclas sold.; He; H ₂	50L	1620	230	200	10	-	85
Acetileno	5L	570	140	18**	-	0,8	10
	20L	900	204	18**	-	4	45
	40L	1345	230	18**	-	7	83
CO ₂	13,4L	670	204	-	-	10	30
	40L	1400	230	-	-	28	70
	50L	1605	230	-	-	3,5	105

* El tipo indica la capacidad de la botella en litros de agua

**Presión máxima de utilización 1kg/cm²

- Tabla 2.5.1.3 Relación de características de suministro de diferentes gases.

Este tipo de instalaciones están sujetas a la APQ 05 y APQ 07, pero presentan riesgos similares en caso de explosión de los recipientes.



- Fig. 2.5.1.4 Rampa de carga de oxígeno de un hospital.

Al igual que los equipos de respiración autónomos, este tipo de recipientes también están sujetos a inspección, según se indica en la tabla siguiente, tabla 2.5.1.4, las normas de aplicación son las indicadas.

Equipo	Norma
Para gases comprimidos (excluyendo el acetileno). Inspección en el momento de llenado”	UNE-EN 1920
Para el transporte de gases. Conjuntos de botellas para gases permanentes y licuados (excluyendo acetileno). Inspección en el momento de llenado	UNE EN 13365
Para el transporte de gas. Botellas para gases licuados (excluyendo el acetileno y el GLP) Inspección en el momento de llenado	UNE-EN 1919
Para el transporte de gases. Condiciones para el llenado de botellas individuales de acetileno	UNE-EN 1801
Para el transporte de gases. Condiciones para el llenado de baterías de botellas de acetileno	UNE EN 12755
Para el transporte de gas. Botellas para acetileno disuelto. Inspección en el momento de llenado	UNE-EN 12754
Portátiles de acero soldado para GLP. Procedimiento de verificación antes, durante y después del llenado	UNE EN 1439

- Tabla 2.5.1.4 Relación de normas de aplicación a las inspecciones de equipos transportables.

En ocasiones se ha producido el fallo de algún equipo de respiración autónomo con consecuencias catastróficas.

Estos equipos como se ha visto, que están sometidos a altas presiones, 200 a 300 bar, pueden provocar accidentes con grandes consecuencias.



- Fig. 2.5.1.5 Fragmentos de un equipo de respiración autónomo, después de una explosión.

2.5.2 Ejemplo de Explosión para un recipiente de respiración autónomo

Para realizar el análisis de efectos y consecuencias del estallido de un recipiente de respiración autónomo, del tipo que se muestra en la Fig. 2.5.2.2.1, en una instalación de un centro de recarga, se realizarán los cálculos primero mediante el Método del TNT equivalente (Anexo V) y segundo mediante el método Baker (Anexo VI). El cálculo del alcance de los fragmentos se realiza mediante el método Baker. (Anexo VII)

2.5.2.1 Datos de partida

Se establecen los datos de partida para que se utilizarán en ambos métodos.

2.5.2.2 Características del recipiente

El equipo de respiración autónomo, tiene una capacidad de 12 litros, (0,012 m³) cargado con aire a 300 bar.

El recipiente tiene un diámetro de 18 cm (0,18 m)

Una longitud aproximada de 60 cm (0,60 m)

La masa del recipiente es de 14 kg



Fig. 2.5.2.1 equipo de respiración autónomo

2.5.2.3 Condiciones de partida

Las condiciones de partida se especifican en la tabla siguiente:

Sustancia	Aire
Tipo de estallido	Explosión de recipiente con gas a presión
P1: (presión absoluta interior)	300 bar (30·10 ⁶ Pa)
Volumen del recipiente	0,012 Litros
$\gamma_1 = C_p/C_v$	1,4
Forma del recipiente	Cilíndrico
Altura sobre el suelo	0 m
Presión atmosférica	101325
Temperatura ambiente	20°C

- Tabla 2.5.2.3.1 condiciones de partida.

El fluido contenido se trata de aire, y en este caso lo consideramos como un gas ideal.

2.6 Evaluación de los resultados

2.6.1 Evaluación del resultado del cálculo mediante el Método del TNT equivalente

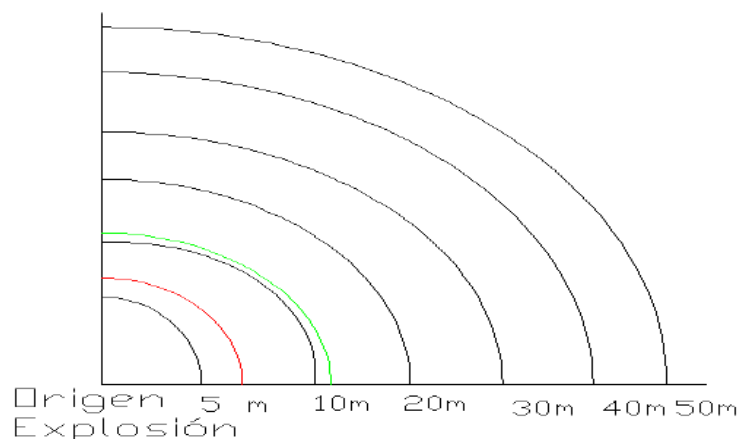
2.6.1.1 Evaluación de la sobrepresión e impulso mediante el Método del TNT equivalente

A continuación se muestran los resultados de los cálculos de la sobrepresión e impulso.

Distancia Real en (m)	Distancia escalada dn	Pico de sobrepresión (bar)	Impulso escalado i'	Impulso i (bar.s)	Duración escalada	Duración de la fase positiva (s)
5	10,8636279	0,15	6,5	2,99163413	3,5	1,610879919
10	21,7272558	0,06	3,3	1,51882964	4,5	2,071131324
20	43,4545115	0,032	0,9	0,41422626	6,3	2,899583854
30	65,1817673	0,022	0,7	0,32217598	6,5	2,991634135
40	86,9090231	0,02	0,6	0,27615084	6,8	3,129709556

- Tabla 8.3.1 Resultado de la sobre presión, impulso y duración.

En la figura siguiente se establece una relación entre el origen de la explosión y las distancias en las que se ha calculado la sobrepresión e impulso. También se muestran las distancias a las que se ha calculado el valor umbral de la zona de intervención (Rojo) y el valor Umbral de la zona de alerta (verde)



- Fig 2.6.1.1.1 Relación de distancias al origen de la explosión Método TNT

Distancia 5 metros

Colapso de tejados, paredes y muros

Sobrepresión 0,15 bar

Cristales rotos

Impulso 2,99 bar.s

Destrucción de estructuras de madera

Daños reparables

Ruido muy fuerte

Destrucción parcial de muros

Porcentaje de rotura de tímpano según la tabla 2.3.9.2.3.1 es del 50%

2.6.1.2 Alcance para el valor umbral de la zona de intervención

Se ha establecido que la sobrepresión máxima es de 12500 Pa ó 0,125 bar

Utilizando la grafica de la figura 4.2.10.1 se obtiene que la relación con la distancia escalada es, $dn = 12,5$, que se corresponde aplicando la ecuación 4.2.10.1, con una distancia de 5,75 metros

2.6.2 Alcance para el valor umbral de la zona de alerta

Se ha establecido que la sobrepresión máxima es de 12500 Pa ó 0,125 bar

Utilizando la grafica de la figura 4.2.10.1 se obtiene que la relación con la distancia escalada es, $dn = 12,5$, que se corresponde aplicando la ecuación 4.2.10.1, con una distancia de 5,75 metros

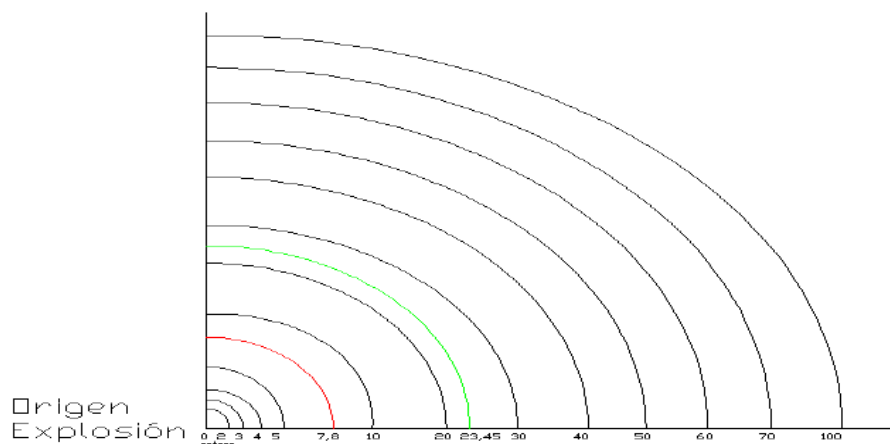
2.6.3 Evaluación del resultado del cálculo mediante el Método Baker

2.6.3.1 Evaluación de la sobrepresión e impulso mediante el método Baker

A continuación se muestran los resultados de la sobrepresión e impulso calculados con el método Baker descrito en el anexo III y realizados en el anexo VI

Distancia en metros	Distancia escalada dn	Sobrepresión estática (bar)	Impulso estático (bar · s)
2	0,767363496	3,24	0,00095
3	1,151045244	0,98	0,00046
4	1,534726992	0,62	0,00032
5	1,918408739	0,33	0,00021
10	3,836817479	0,078	0,00012
20	7,673634958	0,031	0,00005
30	11,51045244	0,023	0,00004
40	15,34726992	0,015	0,00002
50	19,18408739	0,012	0,00002
60	23,02090487	0,0101	0,00001
70	26,85772235	0,009	0,00001
100	38,36817479	0,004	0,00001

-Tabla 9.1.6.1 resultados del cálculo de la sobrepresión estática e impulso con el método Baker



- Fig. 2.6.3.1.1 Relación de distancias al origen de la explosión método Baker

En la figura anterior, se ha establecido la relación entre el origen de la explosión y las distancias en las que se ha calculado la sobrepresión e impulso. También se muestran las distancias a las que se ha calculado el valor umbral de la zona de intervención (Rojo) y el valor Umbral de la zona de alerta (verde)

2.6.3.2 Evaluación de los resultados, consecuencias

Distancia m	Sobrepresión ΔP (bar)	Nivel de daño
2	3,24	Destrucción total de las estructuras Mortandad de más del 1% de las personas que se encuentren en el área
3	0,98	Demolición total de las estructuras. Posibilidad de muerte por daños pulmonares a las personas.
4	0,62	Destrucción total de las estructuras. Rotura de tímpano en las personas.
5	0,33	Destrucción parcial de estructuras.
10	0,078	Cristales rotos en un 100% y bastidores de ventanas arrancados Daños estructurales graves. Techos y paredes destruidos
20	0,031	Cristales rotos en más de un 50 %
30	0,023	Cristales rotos en más de un 50 %
40	0,015	Cristales rotos en más de un 50 %
50	0,012	Cristales rotos en más de un 50 %
60	0,010	Cristales rotos en más de un 50 %
70	0,009	Cristales grandes rotos
100	0,004	Rotura de vidrios por causa del ruido

- Tabla 9.1.6.1 Consecuencias de la sobrepresión

Observando los datos, se puede determinar que a una distancia de entre los 5 y 10 metros se producen daños moderados según se observa en la tabla 2.3.9.3.1.4

2.6.3.3 Alcance para el valor umbral de la zona de intervención

Se ha establecido que la sobrepresión máxima es de 12500 Pa ó 0,125 bar

Mediante la ecuación 6.2.4.5.1 se obtiene la sobrepresión escalda, con un valor de 0,12, eliminado los factores de corrección, resulta una presión escalda de 0.07 y utilizando la grafica de la figura 6.2.4.2.1.1, se obtiene que la relación con la distancia escalada es, $dn = 3$, que se corresponde aplicando la ecuación 6.2.4.1.1 a una distancia de 7,8 metros.

2.6.4 Alcance para el valor umbral de la zona de alerta

Se ha establecido que la sobrepresión máxima es de 5000 Pa ó 0,05 bar

Mediante la ecuación 6.2.4.5.1 se obtiene la sobrepresión escalda, con un valor de 0,0493 eliminado los factores de corrección, resulta una presión escalda de 0.028 y utilizando la grafica de la figura 6.2.4.2.1.1, se obtiene que la relación con la distancia escalada es, $dn = 9$, que se corresponde aplicando la ecuación 6.2.4.1.1 a una distancia de 23,45 metros.

2.6.5 Evaluación de los resultados para la proyección de fragmentos

El alcance máximo del fragmento semiesférico es de 572,89 m

2.7 Conclusiones

- Desconocimiento de aplicación de la legislación de las instalaciones industriales Ley 21 de industria por considerar que no les es de aplicación.
- El desconocimiento del RD 1254, por el que se aprueban medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas, provoca que por el tipo de sustancias o de las cantidades almacenadas, no se toman las medidas adecuadas de de protección.
- Fallos en control de diseño de los equipos e instalaciones que originan accidentes.
- Fallos en los controles de la fabricación.
- Es sumamente importante realizar controles de la ejecución de cualquier tipo de instalación, empezando por el diseño, fabricación, ejecución o instalación de los componentes.
- Hoy en día está devaluado el concepto de realizar un correcto cumplimiento reglamentario de las instalaciones. Es sumamente importante realizar los controles establecidos por legislación en materia de seguridad industrial, puesto que de esta forma se garantiza un mínimo en la seguridad de las instalaciones, realizando las inspecciones periódicas estipuladas, tanto por la reglamentación como por el fabricante de los equipos.
- Es sumamente importante realizar y cumplir los procedimientos o protocolos de revisión de instalaciones.
- Es importante revisar y actualizar periódicamente los procedimientos de operación o funcionamiento normal, incluyendo las operaciones de puesta en marcha y parada, así como aquellos casos extraordinarios.
- Es importante realizar ciclos formativos periódicos del personal encargado del mantenimiento y operación de las instalaciones.

Respecto de la explosión de equipos a presión o recipientes:

- En caso de recipientes móviles y botellas y botellones, es muy importante realizar un correcto uso y almacenamiento de botellas, así como sus revisiones periódicas.
- Evitar todas aquellas situaciones en las que los equipos puedan ser dañados de forma que su integridad estructural pueda verse comprometida.

2.8 Normas y Referencias

Reglamentación y disposiciones legales

2.8.1 Normativa nacional

En España, la Ley de Industria, Ley 21/1992 establece las bases de ordenación del sector industrial, así como los criterios de coordinación entre las Administraciones Públicas. Entre los fines de esta Ley está la de garantizar la seguridad industrial y calidad. Con este fin se establecen los distintos Reglamentos de Seguridad Industrial.

Los Reglamentos de Seguridad establecen las condiciones técnicas o requisitos de seguridad que según su objeto deben reunir las instalaciones, los equipos, los procesos, los productos industriales y su utilización, así como los procedimientos técnicos de evaluación de su conformidad con las referidas condiciones o requisitos.

Los Reglamentos de Seguridad Industrial de ámbito estatal se aprueban por el Gobierno de la Nación, sin perjuicio de que las Comunidades Autónomas, con competencia legislativa en materia de industria, puedan introducir requisitos adicionales sobre las mismas materias cuando se trate de instalaciones radicadas en su territorio.

2.8.1.1 Equipos y recipientes a presión

Con el Reglamento de Aparatos a Presión, aprobado por el Real Decreto 1244/1979, de 4 de abril, se regularon todos los aspectos a tener en cuenta en relación con el diseño, fabricación, reparación, modificación e inspecciones periódicas de los aparatos sometidos a presión. Este Real Decreto, fue derogado con la aprobación del RD 2060/2008, por el que se aprueba el Reglamento de Equipos a Presión, actualmente en vigor y sus (ITC) instrucciones técnicas complementarias 1 a 6, que regula los requisitos de instalación, puesta en servicio, inspecciones periódicas, reparaciones y modificaciones de los equipos a presión, además las instrucciones técnicas complementarias, regulan determinados equipos e instalaciones.

Este reglamento complementa la legislación de equipos a presión prevista en el Real Decreto 769/1999, por el que se traspone a la reglamentación Española la Directiva 97/23/CE, relativa a los equipos a presión y se modifica el Real Decreto 1244/1979.

Por lo que el Real Decreto 2060/2008 viene a actualizar la normativa existente, ya que la Unión Europea ha venido a dictar directivas de aplicación sobre determinados equipos o aparatos a presión que han modificado el Reglamento de Aparatos a Presión aprobado en 1979.

Así, el Real Decreto 473/1988, de 30 de marzo, traspuso la Directiva 76/767/CEE sobre aparatos a presión; el Real Decreto 1495/1991, de 11 de octubre y el Real Decreto 2486/1994, de 23 de diciembre, las Directivas 87/404/CEE, 90/488/CEE y 93/465/CE sobre recipientes a presión simples; el Real Decreto 2549/1994, de 29 de diciembre, las Directivas 75/324/CEE y 94/1/CEE sobre generadores de aerosoles; el Real Decreto 769/1999, de 7 de mayo, la

Directiva 97/23/CE, relativa a los equipos a presión, estableciendo nuevos criterios para el diseño, fabricación y evaluación de la conformidad y el Real Decreto 222/2001, de 2 de marzo, junto con la Orden CTE/2723/2002, de 28 de octubre y el Real Decreto 2097/2004, de 22 de octubre, las Directivas 1999/36/CE, 2001/2/CE y 2002/50/CE, sobre equipos a presión transportables.

Asimismo, los Recipientes a presión simples incluidos en el ámbito de aplicación del Real Decreto 1495/1991, de 11 de octubre, por el que se dictan las disposiciones de aplicación de la Directiva del Consejo de las Comunidades Europeas 87/404/CEE, sobre recipientes a presión simples, se encuentran en el ámbito de aplicación del RD 2060/2008.

El Real decreto 222/2001 de 2 de marzo, por el que se dictan las disposiciones de aplicación de la Directiva 1999/36CE del consejo de 29 de abril, relativa a equipos a presión transportables.

2.8.1.2 Prevención de riesgos laborales

- Ley 31/1995 de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales.
- Real Decreto 1215/1997, de 18 de julio, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de equipos de trabajo.
- 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.
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.

El INSHT, publica las Notas Técnicas de Prevención (NTP), que forman una herramienta de consulta, hay que destacar que no son vinculantes ni de obligado cumplimiento

- NTP 291 Modelos de vulnerabilidad de las personas por accidentes mayores: método Probit.
- NTP 293 Explosiones BLEVE (I) Evaluación de la radiación térmica.
- NTP 294 Explosiones BLEVE (II) Medidas Preventivas.
- NTP 321 Explosiones de nubes de vapor no confinadas. Evaluación de la sobrepresión.
- NTP 326 Radiación térmica en incendios de líquidos y gases.
- NTP 329 Modelo de dispersión de gases y/o vapores en la atmosfera. Fuentes puntuales continuas.
- NTP 342 Válvulas de seguridad (I). Características técnicas.
- NTP 346 Válvulas de seguridad (II). Capacidad de alivio y dimensionado.
- NTP 362 Fugas en recipientes y conducciones. Emisión en fase líquida.
- NTP 385 Fugas en recipientes. Emisión en fase gaseosa.

- NTP 396 Deflagraciones producidas por gases, vapores y polvos combustibles: sistemas de protección.
- NTP 397 Botellas de gas. Riesgos genéricos en su utilización.
- NTP 427 Parámetros débiles para el venteo de alivio de explosiones (I).
- NTP 428 Parámetros débiles para el venteo de alivio de explosiones (II).
- NTP 456 Discos de ruptura (I). Características.
- NTP 457 Discos de ruptura (II). Dimensionado.
- NTP 509 Válvulas de seguridad. Modos de fallo y fiabilidad.
- NTP 510 Válvulas de seguridad. Selección.

2.8.1.3 Accidentes graves

- REAL DECRETO 1254/1999, de 16 de julio, por el que se aprueban las medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas.
- 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.
- 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.
- 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.

2.8.1.4 Accidentes mayores

- REAL DECRETO 886/1988, de 15 de julio, sobre prevención de accidentes mayores en determinadas actividades industriales.

2.8.1.5 Sustancias peligrosas

- 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.
- Real Decreto 255/2003, de 28 de febrero, por el que se aprueba el Reglamento sobre clasificación, envasado y etiquetado de preparados peligrosos.

2.8.1.6 Almacenamiento de productos químicos

- Real Decreto 379/2001, de 6 de abril, por el que se aprueba el Reglamento de almacenamiento de productos químicos y sus instrucciones técnicas complementarias, en especial su ITC MIE APQ-5 (almacenamiento de botellas y botellones de gases comprimidos licuados y disueltos a presión).

2.8.1.7 Instalaciones de gases combustibles

- REAL DECRETO 919/2006, de 28 de julio, por el que se aprueba el Reglamento técnico de distribución y utilización de combustibles gaseosos y sus instrucciones técnicas complementarias ICG 01 a 11.

2.8.1.8 Instalaciones petrolíferas

- Real Decreto 2085/1994, de 20 de octubre por el que se aprueba el Reglamento de instalaciones petrolíferas. Y sus ITC IP 01 Refinerías, e IP 02 Parques de almacenamiento de líquidos petrolíferos.
- Real Decreto 1427/1997, de 15 de septiembre por el que se aprueba la ITC IP 03 del Reglamento de instalaciones petrolíferas. Instalaciones petrolíferas para uso propio.
- Real Decreto 2201/ 1995 de 28 de diciembre por el que se aprueba la ITC IP 04 del Reglamento de Instalaciones petrolíferas. Instalaciones fijas para distribución al por menor de carburantes y combustibles petrolíferos en instalaciones de venta al público.
- Real Decreto 1523/1999 de 1 de octubre por el que se modifica el Reglamento de instalaciones petrolíferas y sus ITC IP 03 e IP04

2.8.1.9 Reglamento de explosivos

- Real Decreto 230/1998 de 16 de febrero por el que se aprueba el Reglamento de explosivos.

2.8.2 Normativa Europea

- Directiva 96/82/CE del Consejo, de 9 de diciembre de 1996, relativa al control de riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas.
- 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.
- ADR transporte de mercancías peligrosas por carretera
- RID transporte de mercancías peligrosas por ferrocarril.

2.8.2.1 Códigos de referencia

Los códigos de referencia, especifican el diseño, la fabricación, la inspección, el montaje, los ensayos y el mantenimiento de los equipos y recipientes a presión.

Fueron desarrollados inicialmente entre otros para la industria petrolera y petroquímica, pero su aceptación ha sido aplicada a otros productos e industrias. Si bien los códigos cubren muchos aspectos, no todos están contemplados, razón por la que existen otras normas complementarias a las mismas.

Los códigos, tienen en consideración aspectos tales como:

- Selección de materiales, propiedades y composición.
- Tamaños y capacidades.
- Métodos de cálculo, inspección y fabricación.
- Códigos de práctica para la operación y seguridad de planta.
- Análisis y determinación de cargas estáticas y dinámicas sobre los equipos.
- Tensiones residuales, stress térmico, fatiga de materiales, concentración de tensiones.
- Mecanismos de desgaste, erosión, corrosión, abrasión. Tipos de recubrimientos.
- Conexiones a tanques – recipientes, de tuberías y válvulas, etc.

▪ Tanques de almacenamiento

Para el cálculo, diseño y construcción de estos equipos existen varias Normas y Códigos, pero las más difundidas y empleadas en las industrias de procesos son las del American Petroleum Institute (API), siendo los estándares aplicables los siguientes:

- API Standard 620 (2008): es aplicable a grandes tanques horizontales o verticales de almacenamiento a baja presión.
- API Standard 625 (2010): aplicable a tanque de almacenamiento de gases licuados.
- API Standard 650 (2007): aplicable depósitos de almacenamiento de combustible.
- API Standard 653 (2009): aplicable a la inspección, reparación y transformación de depósitos de almacenamiento.
- API Standard 2510 (2011): aplicable al diseño y construcción de instalaciones de LPG.
- API Standard 520, (2008): aplicable al tamaño y la selección de los elementos de protección contra sobrepresiones (válvulas de seguridad) para recipientes que no estén en contacto con la llama, como por ejemplo las calderas,
- API Standard 521/ISO 23251:2006. Se aplica a los sistemas de alivio y despresurización destinados al uso en plantas petroquímicas, plantas de gas, instalaciones de gas natural licuado.

▪ Equipos a presión

Para el cálculo, diseño y construcción de estos equipos las normas y códigos más difundidos y aceptados internacionalmente son:

- El código ASME, es un código de diseño, construcción, inspección y pruebas para equipos, entre otros, de calderas y recipientes a presión. Este código tiene aceptación mundial y es usado en todo el mundo.

ASME, BPVC (Boiler and Pressure Vessel Code) (edición 2010).

El código se divide en secciones, que van de la I a la XII, estas son:

- I Calderas de potencia.
 - II Materiales.
 - III Reglas para la construcción de plantas nucleares.
 - IV Calderas de calefacción.
 - V Ensayos no destructivos.
 - VI Recomendaciones para el mantenimiento y la operación de calderas.
 - VII Guías de recomendación para el mantenimiento de calderas de potencia.
 - VIII Recipientes a presión.
 - IX Cualificación de soldadores y procedimientos de soldadura.
 - X Recipientes a presión de fibra y plástico reforzado.
 - XI Reglas para la inspección fuera de servicio de componentes de plantas nucleares.
 - XII Reglas para la construcción y servicio continuo de recipientes transportables.
-
- Underwriters Laboratories (UL)
Standard UL 142: es aplicable a tanques de acero de diferentes diseños soldados en taller para almacenaje de líquidos inflamables y combustibles. UL ha desarrollado más de 1,000 Normas de Seguridad.
-
- British Standard (BS)
 - BS 2594: es aplicable a tanques cilíndricos horizontales de acero al carbono soldado.
 - BS 4994: comprende las especificaciones para el diseño y construcción de recipientes y tanques en plásticos reforzados
 - BS 5500 – Specification for unfired fusion welded pressure vessels
 - BS 5169 - Specification for fusion welded steel air receivers
 - BS 6374: comprende las especificaciones para el recubrimiento de recipientes y tanques con materiales poliméricos.

- ASTM
 - D 3299 / 4021 / 4097: comprende las especificaciones para tanques plásticos reforzados con fibra de vidrio.
- CEN, Comité Europeo de Normalización, que a través de los documentos normativos, establece las Normas EN.
- CODAP Código Francés, para la construcción de recipientes a presión que no estén expuestos a llama.

2.8.3 NORMAS

- UNE EN 2: 1994 Clases de fuego
- UNE EN 2: 2005 Clases de fuego
- UNE EN 1160 Instalaciones y equipos para gas natural licuado: Características generales del gas natural licuado. LNG
- UNE EN 1127-2: 2003 Atmosferas explosivas. Prevención contra la explosión.
- UNE EN 14491:2006 Sistemas de protección por venteo de explosiones de polvo.
- UNE EN 14797:2007 Dispositivos de venteo de explosiones
- UNE EN ISO 14121-1 Seguridad de las máquinas. Evaluación del riesgo.

2.8.4 Bibliografía

- Lucha contra incendios a bordo. Ricard Mari Sagarra y Enrique Gonzalez Pino. AG Grupo. Ministerio de trabajo y Seguridad Social. Madrid 1980. ISBN 8486817013
- Seguridad industrial en plantas químicas y energéticas. Fundamentos, evaluación de diseño y riesgo. J.Mª Storch de Gracia. T García Martín. Ediciones Díaz de Santos. 2008. ISBN 9788479788643
- ¿Qué falló? Desastres en plantas con procesos químicos. ¿Cómo evitarlos? Trevor Kletz. McGraw-Hill. 2002 ISBN 8448133528
- Análisis de riesgo en instalaciones industriales. Joaquim Casal, Ediciones UPC, 1999 ISBN 8483012278
- -Termodinámica 6ª Edición, Yunus A Cengel - Boles. McGraw-Hill 2009 ISBN 9789791072868
- Termodinámica aplicada con EES (Engineering Equation Solver). José Antonio Orosa García, José Antonio Pérez Rodriguez. Tórculo Edicions, 2008. ISBN 978-84-8408-477-8
- Manual para el técnico en prevención de riesgos laborales I. Pedro Mateo, Agustín Fernández Ruiz. Fundación Confemetal. 2003. ISBN 8489786739
- Manual de seguridad laboral I. Ibermutuamur, 2002. ISBN 8495366029
- Manual de seguridad laboral II. Ibermutuamur. 2002. ISBN 8495366029
- Plan especial de Protección Civil de la Comunidad Autónoma de Extremadura sobre transportes de mercancías peligrosas por carretera y ferrocarril. TRANSCAEX. Junta de Extremadura. 2006
- Methods for the calculation of Physical Effects. Due to releases of hazardous materials (liquids and gases).TNO, 2005 Yellow Book.
- Methods for the determination of posible damage. TNO 1989 Green Book ISBN 90-530700524

- Work book for predicting pressure wave and fragment effects of exploding propellant tanks and gas storage vessel. W. E Baker. NASA. 1977
- Pressure Test Safety. G Saville y S M Richardson. Health & Safety Executive BOOKS. 1998. ISBN 0717615421
- Gas Explosion Handbook. Dag Bjerketvedt, Jan Roar Bakke, Kees van Wingerden. 1997 Elsevier Science.
- Understanding Explosions. Daniel A Growl. American institute of Chemical Engineers. 2003. ISBN 0-8169-0779X
- Safety in pressure testing. Health and Safety Executive. 1998. ISBN 978 0 7176 1629 9
- Análisis de consecuencias y zonas de planificación para explosiones industriales accidentales. Tesis Doctoral. Fernando Díaz Alonso. Universidad de Murcia. 2006

2.8.5 Páginas web

www.pjedwards.net

www.et.byu.edu

<http://me.queensu.ca>

www.cdc.gov

www.gexcon.com

www.draeger.com

www.proteccioncivil-andalucia.org

www.explostop.com

www.beaveraquatics.ca

2.8.6 Programas de cálculo

Para los cálculos se ha utilizado el programa EES (Engineering Equation Solver) Versión Académica Profesional V8.881--3D

2.9 Abreviaturas y unidades

2.9.1 Abreviaturas

APQ	Almacenamiento de productos químicos
C_0	Velocidad del sonido en el aire (m/s)
CVE	Confined vapor explosión
d	Distancia en (m)
dn	Distancia escalada o normalizada
E_0	Energía liberada
E_{av}	Energía liberada en el momento de la explosión de un gas
E_{mTNT}	Calor de combustión del TNT que tiene un valor de $4,6 \cdot 10^6$ J/Kg
I	Impulso
i+c	Clasificación de la fase positiva del impulso específico.
i+	Impulso específico de la fase positiva.
ICG	Instrucción complementarias de gas.
INSHT	Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo
IP	Instalaciones petrolíferas
ITC	Instrucción Técnica Complementaria
Mf	Masa de un fragmento de un recipiente o equipo a presión
Mv	Masa de un recipiente o equipo a presión.
N_2	Nitrógeno
NTP	Nota técnica de prevención
O_2	Oxígeno
P(t)	Presión por encima de la presión ambiente, en tiempo t
Pc	Clasificación de la presión máxima
$P_{m\acute{a}x}$	Presión máxima derivada de los valores de ensayo medidos.
Pr	Presión reflejada
P`	Sobrepresión escalada
Q	Presión dinámica
R	Constante de los gases ideales
RD	Real Decreto
T	Temperatura

t	Tiempo.
t+c	Clasificación de la duración de la fase positiva.
t+	Duración de la fase positiva, derivada de los valores de ensayo medidos.
tΔc	Duración triangular calculada a partir de los valores de Pc e i+c.
tΔ	Duración triangular calculada a partir de P _{máx} e i+.
TNT	Trinitrotolueno, compuesto químico de alto poder explosivo
U	Velocidad de desplazamiento de la onda (m/s)
U _r	velocidad media de la onda reflejada
UCVE	Unconfined vapor explosion
v _i	Velocidad inicial de un fragmento
W _{TNT}	Peso equivalente de TNT
ZI	Zona de intervención
ZA	Zona de alerta
Φ	Diámetro
ρ _s	Densidad del aire (Kg/cm ²)
μ _a	Masa molecular media (0,029 kg/mol)
α	Rendimiento o eficiencia de una explosión

2.9.2 Unidades

Área:	1 m ²
Densidad:	1g/cm ³
Energía:	1 kJ= 1000 J = 1000 N·m= 1kPa·m ³ 1kWh= 3600kJ 1 Cal = 4,1868 kJ
Fuerza:	1 N= 1 kg·m/s ²
Potencia:	1 W = 1 J/s
Presión:	1 bar = 1·10 ⁵ Pa 1 atm = 760 mmHg = 101325 Pa 1 Pa = 1N/m ²

Calor específico: 1 kJ/kg · °C

Constante de los gases universales R = 8,31447 kJ/kmol ·K

Presión atmosférica: 1 atm = 101325 Pa

Velocidad del sonido en el aire C₀= 331,36 m/s

EXPLOSIÓN DE EQUIPOS A PRESIÓN. ANÁLISIS DE RIESGOS Y CONSECUENCIAS

ANEXOS



Facultat de Nàutica de Barcelona

FECHA: **JUNIO 2012**

AUTOR: **D. Saturnino Galán Fontenla**

3 ANÉXOS

3.1 Índice de anexos

▪ Anexo I Método del TNT equivalente	Pág. 98
▪ Anexo II Método multienergía	Pág. 107
▪ Anexo III Método Baker	Pág. 111
▪ Anexo IV Cálculo de la proyección de fragmentos	Pág. 124
▪ Anexo V Ejemplo de cálculo mediante el método del TNT equivalente.	Pág. 138
▪ Anexo VI Ejemplo de cálculo mediante el método Baker	Pág. 141
▪ Anexo VII Ejemplo de cálculo aplicado a la proyección de fragmentos	Pág. 149

4 ANEXO I MÉTODO DEL TNT EQUIVALENTE

Calculo de explosiones a través del método del TNT equivalente (detonación de sustancias explosivas, pirotécnicas o inestables)

4.1 Introducción

El método del TNT equivalente permite hallar la equivalencia entre la masa de una sustancia que interviene en una explosión y la cantidad de TNT (trinitrotolueno) que produjera los mismos efectos, para poder calcular los efectos de cualquier sustancia explosiva por comparación de la energía generada con la que liberaría esa cantidad equivalente de TNT (W_{TNT} , kg).

4.2 Secuencia de aplicación del método

La secuencia de aplicación del método es la siguiente:

Para la aplicación del método del TNT equivalente, se tienen que realizar los cálculos de los siguientes puntos:

- Cálculo de la masa equivalente de TNT.
- Cálculo de la sobrepresión e impulso en las distancias de interés.
- Radio a la sobrepresión de interés.
- Gráfico de sobrepresión frente a la distancia.

4.2.1 Determinación de la masa de TNT equivalente

Determinar la masa de TNT equivalente (en Kg), a través de la relación entre la energía liberada en la explosión, (E_{exp}), cuyo origen, como se ha visto, puede ser el de un explosivo, una nube de vapor explosivo o el de un gas a presión almacenado en un recipiente. Por lo tanto, independientemente de donde provenga esta energía, la relación entre la Masa de TNT y la energía liberada es:

$$W_{TNT} = \alpha \frac{E_{exp}}{E_{mTNT}} \quad (\text{Kg}) \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Donde:

α es el rendimiento de la explosión.

E_{exp} es la energía liberada en la explosión

E_{mTNT} calor de combustión del TNT que tiene un valor de $4,6 \cdot 10^6$ J/Kg

Según se ha visto, la energía liberada en el momento de la explosión (E_{exp}), puede provenir de distintas fuentes, según su origen, se calcula diferentes formas.

4.2.2 Determinación de la energía liberada en la explosión

La energía liberada en el momento de la explosión, depende del tipo de sustancia que intervenga en el proceso.

De forma general, se aplica la ecuación 4.2.2.1.

La energía liberada por una sustancia explosiva es:

$$E_{exp} = W_{exp} \cdot \Delta H_{exp} \quad \text{Ecuación 4.2.2.1}$$

Donde:

W_{exp} es la masa en (Kg) de la sustancia implicada en la explosión

ΔH_{exp} es la entalpía de la reacción de explosión en (J/Kg)

Dependiendo del tipo del tipo de explosión, nos encontramos con los siguientes casos:

4.2.3 Determinación de la energía liberada en la explosión para nubes de vapor

Previamente debe determinarse la cantidad de combustible que se encuentra entre los límites de inflamabilidad (W_c , kg), mediante un 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}).

La energía liberada para una nube de vapor es:

$$E_{exp} = W_c \cdot \Delta H_c \quad \text{Ecuación 4.2.3.1}$$

4.2.4 Determinación de la energía liberada en el estallido 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. Existen diferentes formas de cálculo, según las condiciones específicas de cada caso:

Determinación de la energía liberada en el estallido de recipientes, considerando su contenido como gas ideal.

La energía que libera un gas ideal comprimido al expandirse hasta la presión atmosférica, se calcula mediante la expresión:

$$E_{av} = \frac{(P_1 - P_0)V_g}{\gamma_1 - 1} \quad \text{Ecuación 4.2.4.1}$$

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.

4.2.5 Determinación de la energía liberada para un 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 y final de la expansión.

$$u = h - p \cdot v \quad \text{Ecuación 4.2.5.1}$$

Donde:

u : Energía interna específica (J/kg).

h : Entalpía específica (J/kg).

p : Presión absoluta (Pa).

v : Volumen específico (m^3/kg).

La energía liberada en el estallido se determina considerando la masa total del sistema, M_{total} , que es la misma en ambas situaciones.

$$E_v = m \cdot (u_2 - u_1) \quad \text{Ecuación 4.2.5.2}$$

Donde:

E_v es la energía liberada en la expansión del vapor o gas en KJ

m es la masa de vapor existente en el depósito en el momento de producirse el estallido en kg

u_1 es la energía interna del vapor en las condiciones en las cuales el recipiente sufre la explosión

u_2 es la energía interna del vapor después de la expansión hasta la presión atmosférica.

4.2.6 Determinación de la eficiencia de la explosión

El principal problema del método del TNT equivalente es la determinación del parámetro α , que es el que representa el rendimiento de la explosión. Este rendimiento representa la fracción de la energía liberada que se invierte en generar la onda de presión, o dicho de otro modo, representa el coeficiente entre la energía real liberada y la teóricamente disponible.

Se establecen varios casos en función de las sustancias implicadas y el entorno.

4.2.7 Eficiencia de la explosión para sustancias explosivas

En el caso de sustancias explosivas, se adoptan valores de α del orden de la unidad, ya que se acepta que el factor de eficiencia es máximo.

4.2.8 Eficiencia de la explosión para nubes de vapor

En el caso de nubes de vapor, la eficiencia de la explosión es baja, ya que la mayor parte de la energía liberada se disipa en forma de calor o de energía luminosa, llamada, invirtiéndose solo una pequeña cantidad de energía en la generación de la onda de presión.

También se supone que toda la materia inflamable de la nube (W_{exp}) está disponible para la combustión y que la energía teóricamente disponible (E_{exp}) es por lo tanto el producto de la cantidad total de materia inflamable en la nube por el calor de combustión (ΔH_{exp}) (potencia calorífica). Pero como se sabe esto no es así pues no toda la masa de la nube se encuentra en el límite de inflamabilidad. Sobre esta base, el rendimiento de la explosión está normalmente en el rango de 1 a 10%.

Por ello se adoptan valores de entre el 3 y 4 %, es decir 0,03 o 0,04.

La eficiencia de la explosión, depende de ciertas características. La eficiencia será mayor cuando:

- Aumente el grado de obstrucción o de confinamiento de la nube de gases.
- La fuente de ignición tenga un valor de energía elevado.
- La composición de la mezcla sea lo más homogénea posible o se acerque lo máximo posible a la relación estequiometría.

4.2.9 Eficiencia de la explosión para estallido de recipientes

Se estima que en explosiones de recipientes que contienen un gas, el reparto de la energía liberada es el siguiente:

- El 30% en la onda de presión.
- El 40% en la energía cinética conferida a los proyectiles.
- El 30 % en otras formas de energía (disipación de calor, etc)

Aunque es muy difícil cuantificar dicho reparto, se sugiere utilizar el valor del 50%

4.2.10 Cálculo de la sobrepresión e impulso en las distancias de interés

Una vez se conoce la masa equivalente de TNT (W_{TNT}), se puede determinar el valor del pico de sobre presión (ΔP), el impulso (i), y la duración de la fase positiva (t^+) en un punto situado a una distancia (d) del lugar de la explosión, de su origen. Para ello hay que utilizar las graficas en los cuales los parámetros están calculados según una “distancia normalizada”.

Esta distancia normalizada, se calcula mediante la expresión:

$$d_n = \frac{d}{\sqrt[3]{W_{TNT}}} \quad \text{Ecuación 4.2.10.1}$$

Donde:

d_n es la distancia normalizada

Una vez calculada la distancia normalizada (d_n) se calcula la sobrepresión (ΔP) y el impulso escalado o normalizado, a través de la ecuación:

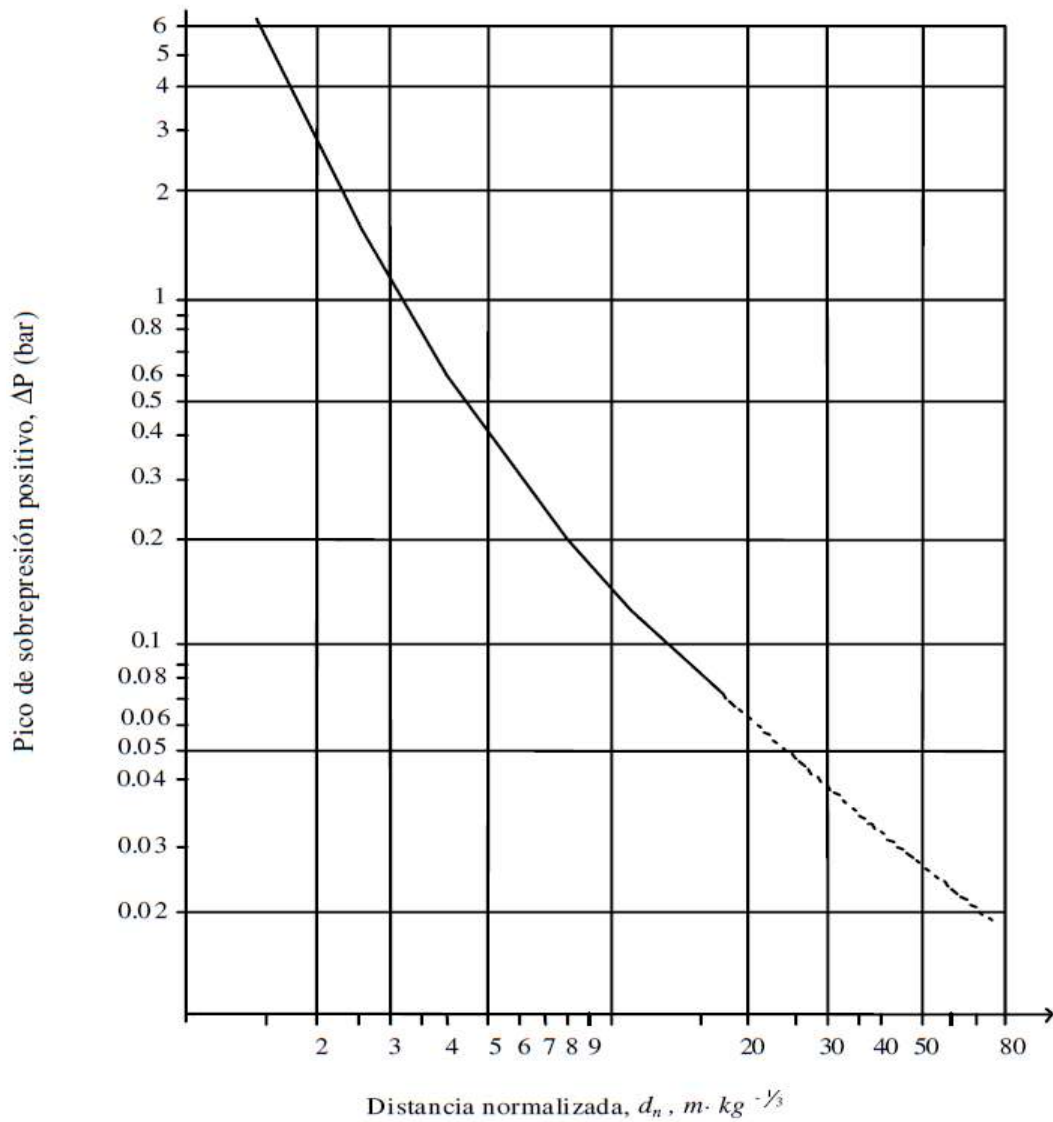
$$\hat{i} = i \cdot W_{TNT}^{1/3} \quad \text{Ecuación 4.2.10.2}$$

Donde:

i es el impulso de la onda de presión

\hat{i} es el impulso escalado

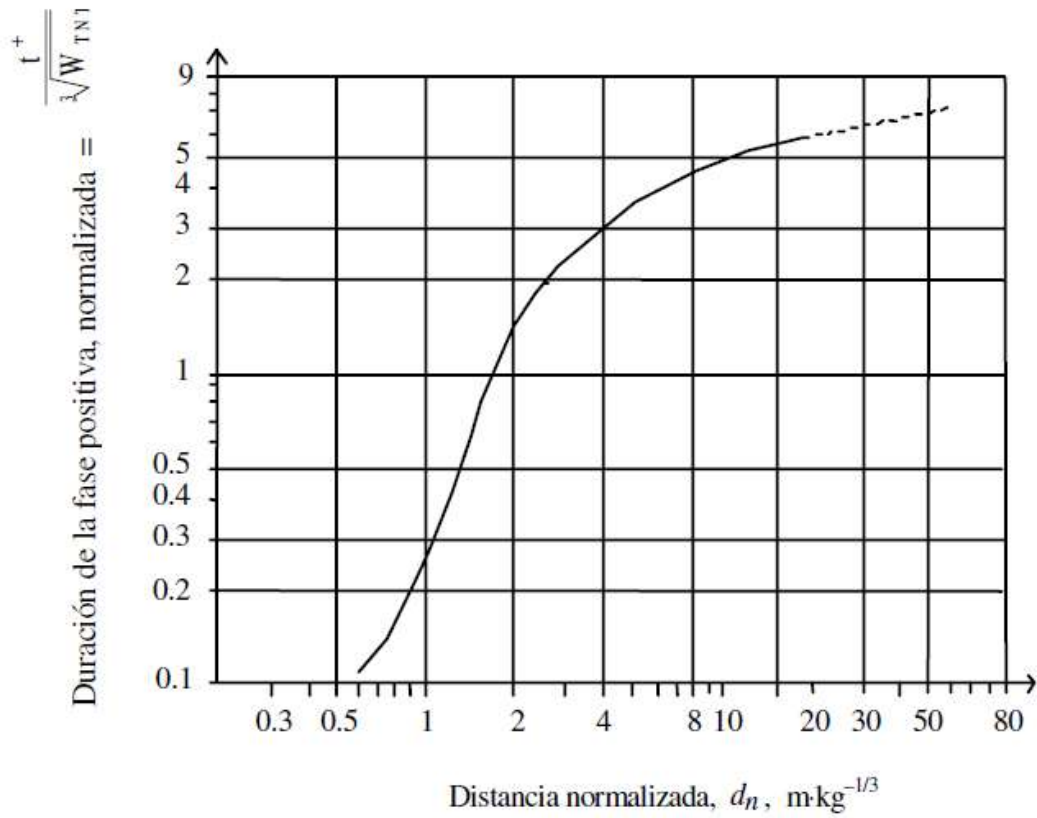
Con el cálculo de la distancia normalizada, se obtiene el valor del pico de sobre presión de la fase positiva, y se utiliza la grafica siguiente, figura, 4.2.10.1



- Fig. 4.2.10.1 Valor del pico de sobre presión según la distancia normalizada

4.2.11 Cálculo de la duración de la fase positiva de la onda de choque

Para realizar el cálculo de la duración de la sobrepresión, se utiliza la tabla grafica siguiente, figura 4.2.11.1 en la que empleando la distancia normalizada se obtiene el valor de la duración de la sobrepresión.



- Fig. 4.2.11.1, Duración de la fase positiva de la onda de choque según la distancia normalizada.

4.3 Evaluación de los resultados

Con los datos obtenidos de las graficas y ecuaciones anteriores, se obtiene los datos de distancia, sobrepresión e impulso, necesarios para poder evaluar la respuesta de las personas y estructuras.

4.3.1 Respuesta de las estructuras antes los efectos de la onda de choque

Los efectos de la sobrepresión se establecen en las tablas 2.3.9.3.1.2, 2.3.9.3.1.3. y 2.3.9.3.1.4

A modo de resumen, se establece la siguiente tabla

ΔP_{\max} (bar)	Daños Materiales	Daños personales
0,01	- - -	- - -
0,07	Rotura de algún cristal	- - -
0,14	Rotura de todos los cristales de ventanas	- - -
0,16	Rotura de tabiques y paneles	- - -
0,17	Rotura de paredes de bloques de cemento	Rotura de tímpanos
0,16 – 0,20	Colapso parcial de estructuras de hormigón, 40 – 60 cm de espesor, destrucción total de viviendas ordinarias.	- - -
0,20 – 0,27	Rotura de tanques para almacenamiento de líquidos, colapso de estructuras metálicas en edificios de construcción ordinaria.	- - -
0,35	Casas quedan inhabitables	- - -
0,43		Daños pulmonares graves a personas
0,47	Vuelco de vagones de ferrocarril	
0,50	Rotura de paredes de ladrillo. Las casas requieren demolición.	
0,70	Ya casi no se requiere demolición (75% de destrucción)	Umbral de daños graves a personas.
1,00 – 2,00	100 % de destrucción	Probabilidad muy alta de lesiones graves a personas.
3,29	- - -	Mortandad del 1 %
4,06	- - -	Mortandad del 50 %
5,00	- - -	Mortandad del 99 %

- Tabla 4.3.1.1 Tabla resumen de los efectos de la sobrepresión originada por una explosión.

5 ANEXO II MÉTODO MULTIENERGÍA

Calculo de explosiones a través del método multienergía.

5.1 Introducción

El método de cálculo de consecuencias de explosiones, mediante el método multienergía, se utiliza principalmente con nubes de gases o vapores.

Como se ha visto, las nubes de gases, cuando se inflaman, estos procesos, a menudo, van acompañados de un desprendimiento de grandes cantidades de energía, calor, y pueden estar asociadas a un incremento de presión y a un desprendimiento de sustancias peligrosas. Además se sabe que no toda la masa de gas está dentro de los límites de inflamabilidad.

5.2 Secuencia de aplicación del método multienergía

El método, se basa en predecir de forma rápida y sencilla los siguientes parámetros.

- Forma de la onda de sobrepresión.
- Duración de la onda de sobrepresión.
- Valor de la sobrepresión de la onda.
- Valor del impulso de la onda de sobrepresión.

El método se basa en el principio de que solo una parte de la nube de gas genera la onda de sobrepresión. Por lo que se considera la explosión total como un conjunto de pequeñas explosiones.

El modelo supone que el total del volumen que abarca la nube de gas, se encuentra en mezcla estequiométrica, es decir, la mezcla contiene el aire mínimo o teórico necesario para la combustión, es decir, el aire teóricamente indispensable para que todo el carbono, todo el hidrógeno y todo el azufre de un combustible se combinen con el oxígeno del aire.

Por lo tanto los parámetros que se deben de calcular para la aplicación del método multienergía son:

- Determinación del radio de la nube de gas.
- Determinación de la distancia normalizada.
- Determinación de la energía liberada.
- Sobrepresión adimensional.
- Duración de la fase positiva adimensional.

5.2.1 Determinación del radio de la nube

Se supone que la nube es semiesférica (de radio R_0), y la concentración de la mezcla estequiométrica y homogénea.

$$R_0 = \left(\frac{1,5 \cdot V_{\text{area confinada}}}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ecuación 5.2.1.1}$$

5.2.2 Determinación del valor de sobrepresión

Para el cálculo del pico de sobre presión ΔP y de la duración de la fase positiva t^+ , es necesario calcular la distancia normalizada \bar{R} , que se calcula a través de la expresión siguiente:

$$\bar{R} = \frac{R}{\left(\frac{E}{P_0} \right)^{\frac{1}{3}}} \quad \text{Ecuación 5.2.2.1}$$

5.2.3 Determinación del valor de la energía liberada en la explosión

Energía liberada en la explosión, que se expresa a través de la ecuación:

$$E = \eta \frac{V_{\text{area confinada}}}{C \cdot \rho_f} \cdot \Delta H_c \quad \text{Ecuación 5.2.3.1}$$

Donde:

ΔH_c es el calor de combustión del hidrocarburo en (J/Kg)

5.2.4 Determinación del valor de la sobrepresión

Sobrepresión adimensional, que se expresa a través de la ecuación:

$$\Delta \bar{P}_s = \frac{\Delta P_s}{P_0} \quad \text{Ecuación 5.2.4.1}$$

5.2.5 Determinación de la duración de la fase positiva

Duración de la fase positiva adimensional:

$$\bar{t}^+ = \frac{t^+ c_0}{\left(\frac{E}{P_0} \right)^{\frac{1}{3}}} \quad \text{Ecuación 5.2.5.1}$$

Donde:

c_0 es la velocidad del sonido en el aire (340 m/s)

La principal dificultad de este método, es la de seleccionar el nivel de explosión adecuado, debido a la cantidad de parámetros que influyen en el proceso.

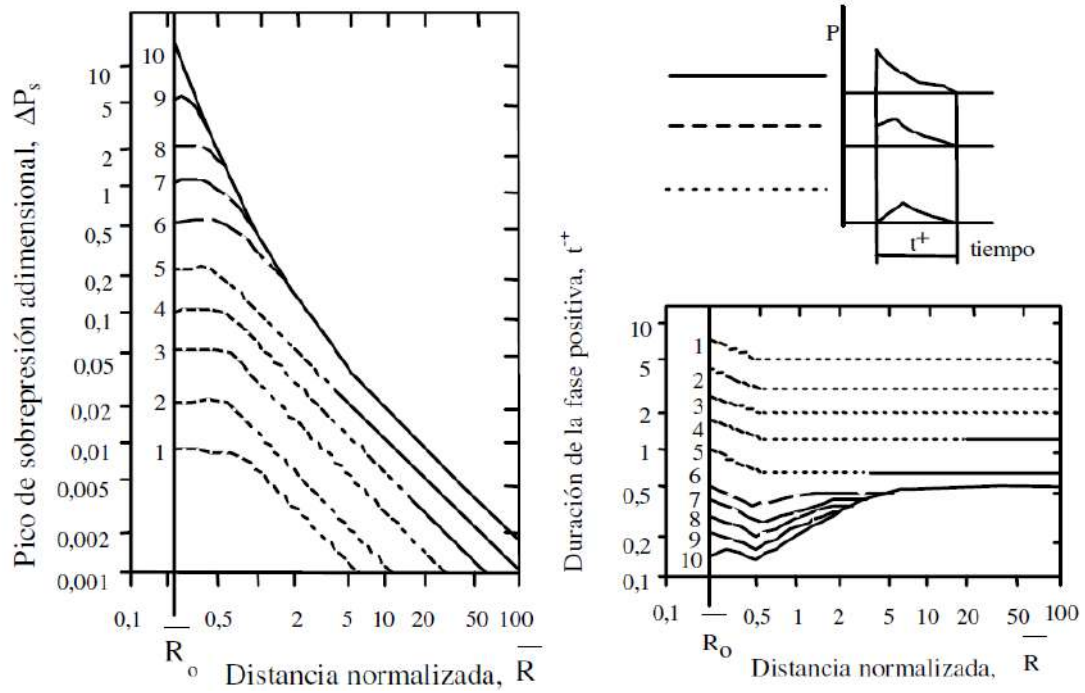
La intensidad de la explosión depende de la masa y del tipo de combustible, de la concentración y del área obstruida, entendiéndose ésta como aquella zona en la que hay una elevada densidad de objetos, instalaciones o equipos.

5.3 Evaluación de los resultados

Una vez obtenidos los datos calculados anteriormente con las ecuaciones, es necesario utilizar las graficas de la figura 5.3.1.

En cada uno de los gráficos de la figura 5.3.1, se pueden observar diez curvas numeradas del 1 al 10. Hay que escoger el valor que corresponda a la energía explosiva inicial. Este es quizás el problema más importante de este método; en todo caso, si no son necesarios resultados muy exactos, se puede resolver de la manera siguiente:

- Para efectos en zonas cercanas se toma el valor 10, que es conservador ya que supone la existencia de detonación.
- Para puntos alejados se puede tomar cualquier valor mayor que 6 ya que como se puede deducir de las gráficas, los efectos en distancias largas no dependen de la energía inicial.
- Se puede considerar el nivel 7 cuando la explosión se produzca en una región obstruida.
- Se puede tomar el nivel 3 en una zona sin obstáculos.
- En caso de que los resultados obtenidos sean exageradamente conservadores entonces se tendrá que estimar la energía inicial de un modo más preciso (experimentalmente o bien mediante un análisis histórico de accidentes).



- Fig. 5.3.1. Graficas necesarias para el cálculo del pico de presión frente a la distancia normalizada, y la duración de la fase positiva frente a la distancia normalizada.

6 ANEXO III MÉTODO BAKER

Cálculo de explosiones a través del método Baker, aplicable a la explosión de recipientes.

6.1 Introducción

Como se ha visto anteriormente, el principal efecto de la rotura de un recipiente, es la formación de una onda de presión.

La rotura del recipiente, puede ser debida como se ha visto a diferentes causas: generación de altas presiones en el interior del recipiente, debilidad estructural del recipiente, fallo de los materiales, etc.

En el momento de la rotura del recipiente, la energía puesta en juego, como se ha visto se invierte en: la formación de la onda de presión, en la proyección de fragmentos, y otras formas de energía como puede ser la del calor.

En los métodos anteriores, TNT equivalente en el anexo I y el método multienergía en el anexo II, estos, o bien tienen limitaciones como el caso de TNT equivalente o bien están enfocados al estudio de la explosión de nubes de gas, caso del método multienergía.

El método de cálculo aquí propuesto estudia la explosión de recipientes a presión, y las explosiones BLEVE, realizando cálculos sobre los parámetros de la onda de sobrepresión y el impulso, así como también establece la metodología para la estimación del alcance los fragmentos generados en la explosión del recipiente.

El método se aplica para el cálculo de los parámetros característicos de la onda de presión:

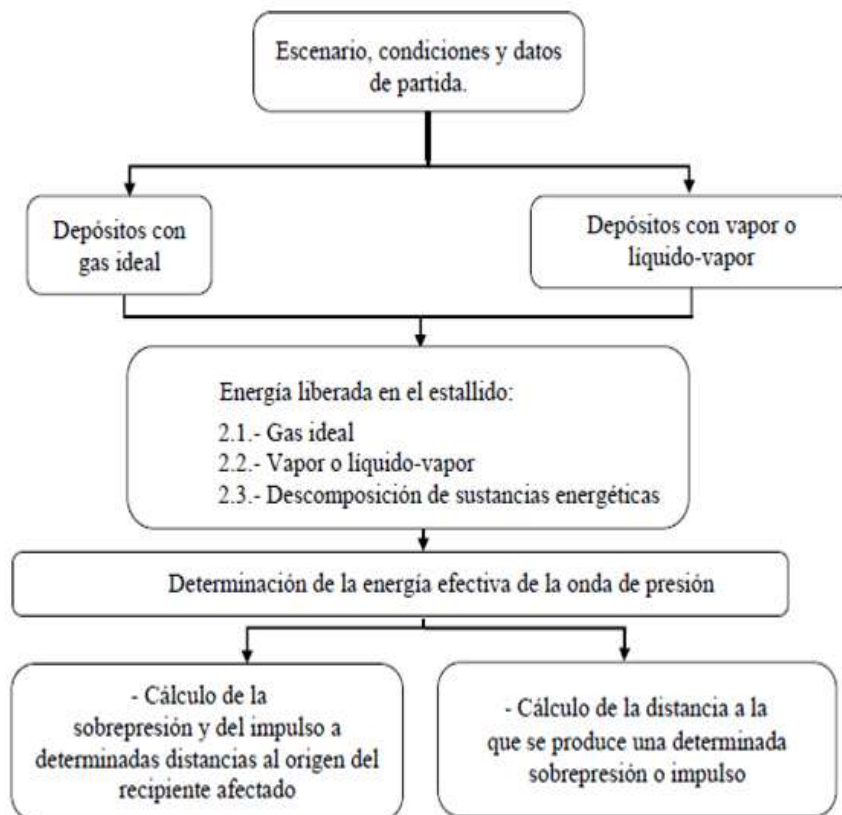
- Sobrepresión.
- Impulso.
- Determinación del alcance de los fragmentos.

Estos cálculos, dependen de las siguientes variables:

- Estado en el que se encuentra el fluido (gas, vapor, líquido – vapor)
- Se consideran recipientes que se encuentran elevados del suelo y esféricos.
- Se utilizan factores de corrección para depósitos cilíndricos, también se aplica el factor de corrección en caso de recipientes que se encuentren próximos al suelo.

6.2 Secuencia de aplicación del cálculo

La secuencia de cálculo se representa gráficamente en la figura 6.2.1.



- Fig. 6.2.1. estructura secuencia de cálculo método Baker

6.2.1 Determinar los datos de partida

Se establece el escenario con los datos y condiciones de inicio.

Los datos necesarios de partida son:

- Conocer la sustancia y estado físico (gas, vapor o líquido-vapor).
- Conocer la 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 establecida en la tabla 6.2.2.3.1

- Conocer el volumen del recipiente ocupado por el gas y, en su caso, por el líquido.
- Conocer la constante de Poisson del gas, γ_1 (C_p/C_v).
- Conocer la forma del recipiente: cilíndrico o esférico. Así como su situación: en el suelo o elevada.

6.2.2.2 Determinación de la energía liberada para un sistema (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.

$$u = h - p \cdot v$$

Ecuación 6.2.2.2.1

Donde:

u : Energía interna específica (J/kg).

h : Entalpía específica (J/kg).

p : Presión absoluta (Pa).

v : Volumen específico (m³/kg).

La energía liberada en el estallido se determina considerando la masa total del sistema, M_{total} , que es la misma en ambas situaciones.

$$E_v = m \cdot (u_2 - u_1)$$

Ecuación 6.2.2.2.2

Donde:

E_v es la energía liberada en la expansión del vapor o gas en KJ

m es la masa de vapor existente en el depósito en el momento de producirse el estallido en kg

u_1 es la energía interna del vapor en las condiciones en las cuales el recipiente sufre la explosión

u_2 es la energía interna del vapor después de la expansión hasta la presión atmosférica.

6.2.2.3 Determinación de la energía efectiva de la onda de presión, para sustancias energéticas

Para determinar la energía efectiva de la onda de presión, se utilizan los parámetros de la tabla siguiente, tabla 6.2.2.3.1.

Causa de la rotura	Presión de fallo
Fallo de los materiales	Presión de almacenamiento u operación
Fuego externo	1,21 veces la presión de abertura de la válvula de seguridad.
Sobrellenado y fallo de válvula de seguridad	Presión de diseño del recipiente x (factor de seguridad α) que suele ser $\alpha=2,5$
Reacción fuera de control	Presión de diseño del recipiente x (factor de seguridad α) que suele ser $\alpha=2,5$
Explosión interna	Mezcla cercana al límite inferior de explosividad: 3 ó 4 veces la presión inicial.
Explosión interna	Mezcla estequiométrica: 8 a 10 veces la presión inicial.

- Tabla 6.2.2.3.1 Valores de la presión de rotura de un recipiente establecidos para el método Baker.

6.2.3 Determinación de la energía efectiva de la onda de presión, E_{exp}

Se 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. 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:

$$E_{exp} = A_{sb} E_{av} \quad \text{Ecuación 6.2.3.1}$$

Donde:

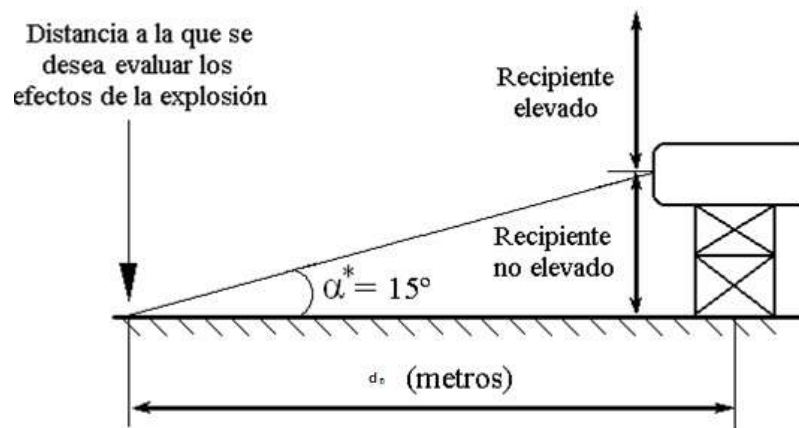
E_{av} = Energía que liberaría la expansión de un gas ideal.

A_{sb} tiene en cuenta la mencionada reflexión de la onda contra el suelo.

A_{sb} = 1 cuando el recipiente se encuentra suficientemente elevado.

A_{sb} = 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, es decir, el ángulo α de la distancia normalizada d_n es $\alpha \leq 15^\circ$, tal y como se muestra en la figura.6.2.3.1. Si α^* es superior a 15° el recipiente se considera que está elevado.



- Fig. 6.2.3.1. Representación del ángulo del punto a la distancia normalizada al recipiente.

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 o cálculo de la distancia a la que se produce una determinada sobrepresión impulso.

6.2.4 A Cálculo de la sobrepresión y del impulso a determinadas distancias del origen

Para el cálculo de la sobrepresión y del impulso a determinadas distancias del origen de la explosión del recipiente a presión afectado, se procede siguiendo los puntos siguientes.

6.2.4.1 Cálculo de la distancia normalizada o escalada

La distancia normalizada, desde el origen de la explosión hasta el lugar donde se desea evaluar los efectos de la misma (d_n , adimensional) se ha define ahora para el método Baker como:

$$d_n = d \left(\frac{P_0}{E_{exp}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ecuación 6.2.4.1.1}$$

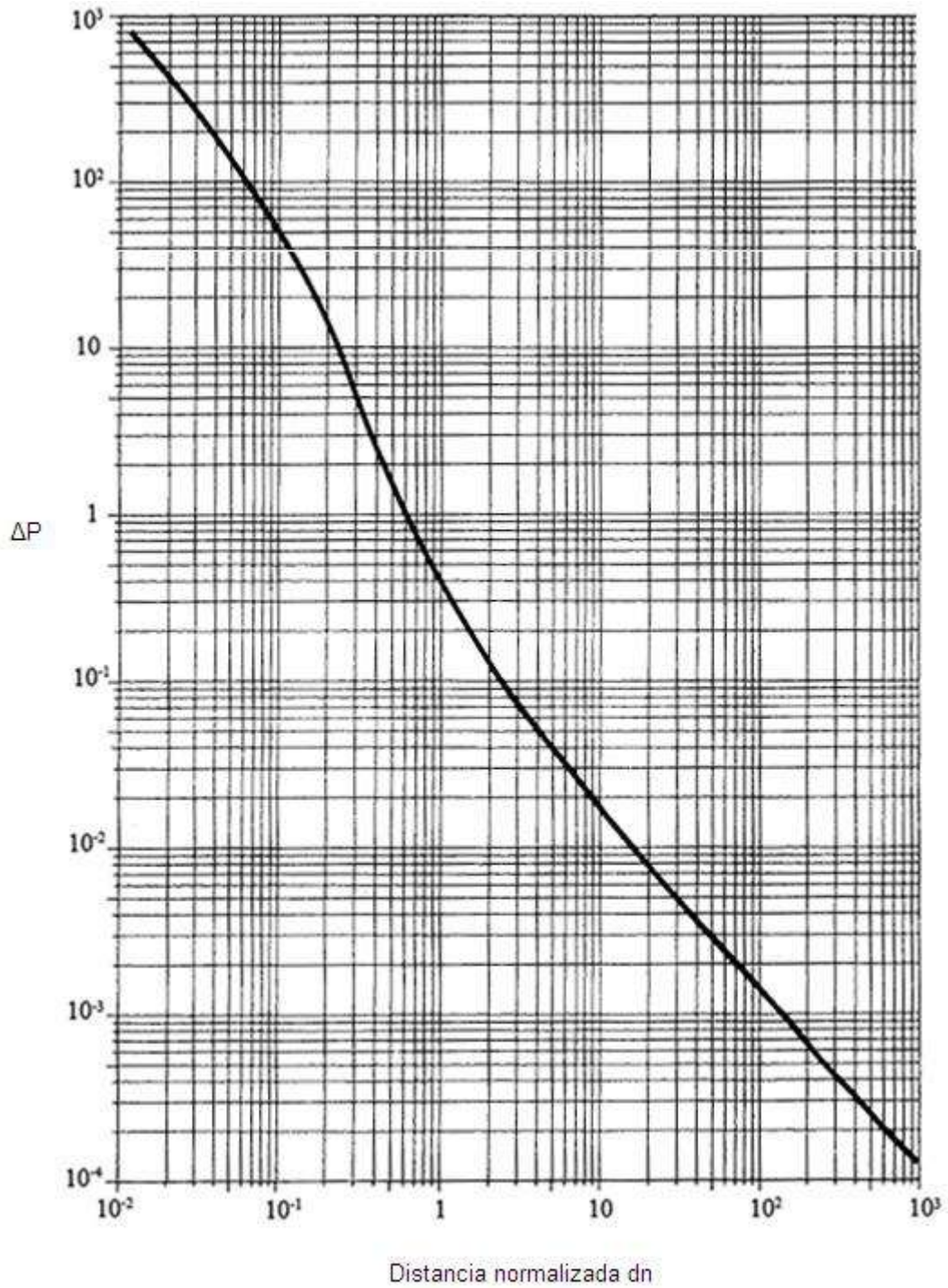
Donde d es la distancia en metros al recipiente desde el punto antes considerado, y E_{exp} se ha obtenido en la etapa anterior.

6.2.4.2 Determinación de la sobrepresión normalizada

En el caso del método Baker aplicable a la explosión de recipientes, existen dos formas diferentes de calcular la sobrepresión.

6.2.4.2.1 Sobrepresión en caso de ($d_n < 2$)

Para distancias donde ($d_n > 2$) se utiliza la Fig.6.2.4.2.1.1, que permite determinar la sobrepresión normalizada ΔP .



- Fig. 6.2.4.2.1.1, Grafica distancia normalizada - sobrepresión normalizada. Para ($dn < 2$)

6.2.4.2.2 Sobrepresión para distancias próximas al origen de la explosión

Para distancias próximas al origen de la explosión de depósitos ($d_n < 2$) que contengan gases ideales o debidos a reacciones fuera de control, Baker propone un procedimiento que permite obtener resultados más exactos, conocido como método de Baker refinado.

La secuencia que debe seguirse para la aplicación del método de Baker refinado se indica a continuación:

6.2.4.2.2.1 Cálculo relación de la velocidad del sonido en el gas comprimido y el aire

Cálculo de la relación de la velocidad del sonido en el gas comprimido y en el aire. (c_1/c_0).

Para un gas ideal, dicha relación se calcula mediante la ecuación:

$$\left(\frac{c_1}{c_0}\right)^2 = \frac{\gamma_1 T_g \mu_a}{\gamma_a T_a \mu_1} \quad \text{Ecuación 6.2.4.2.2.1.1}$$

Donde:

c_1 Velocidad del sonido en el gas comprimido (m/s).

c_0 Velocidad del sonido en el aire ambiente, 343 (m/s)

γ_1 Relación de calores específicos del gas (adimensional).

γ_a Relación 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).

6.2.4.2.2.2 Cálculo de la distancia inicial

A partir de esta distancia se determina la sobrepresión de la onda.

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 (r_0 , metros) equivalente al volumen de gas contenido en el recipiente real (V_g , m^3).

$$r_0 = \left(\frac{3V_g}{2\pi}\right)^{\frac{1}{3}} = 0,782 V_g^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ecuación 6.2.4.2.2.2.1}$$

Esta distancia es la mínima para determinar la sobrepresión, que debe convertirse en la distancia-energía escalada (R'_0), definida mediante la ecuación:

$$d_{n0} = r_0 \left(\frac{P_0}{E_{exp}}\right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ecuación 6.2.4.2.2.2.2}$$

6.2.4.2.2.3 Cálculo de la sobrepresión escalada

Cálculo de la sobre presión escalada de la onda 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:

Siendo además la sobrepresión escalada $P'_{S0} = \left(\frac{p_{S0}}{p_a}\right) - 1$ Ecuación 6.2.4.2.2.3.1

Que se expresa de la forma:

$$\frac{P_1}{P_0} = (P'_{S0} + 1) \cdot \left(1 - \frac{(\gamma_1 - 1)(C_0/C_1)P'_{S0}}{(2\gamma_a(2\gamma_a + (\gamma_a + 1))P'_{S0})^{1/2}}\right)^{\frac{-2\gamma_1}{\gamma_1 - 1}}$$
Ecuación 6.2.4.2.2.3.2

Donde:

p_1 Presión inicial absoluta del gas comprimido antes del estallido (Pa).

P_0 Presión atmosférica (Pa).

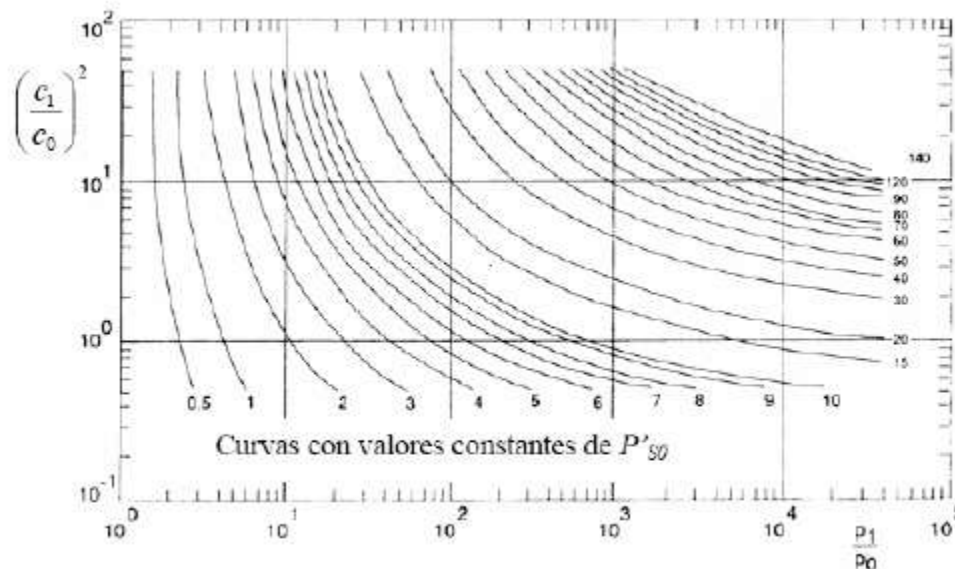
γ_a Relación de calores específicos del aire (1.4).

γ_1 Relación 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).

También se puede calcular P_{S0} a través de las siguientes graficas, figura 6.2.4.2.2.3.1, y 6.2.4.2.2.3.2.



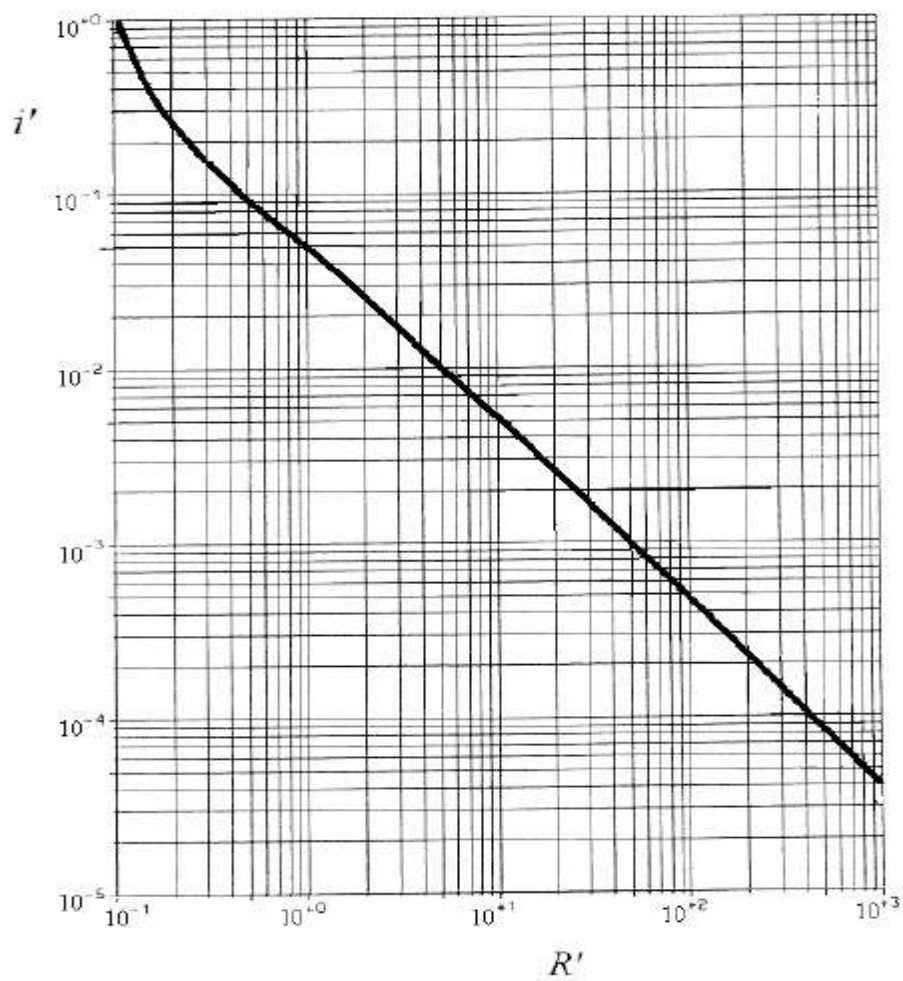
- Fig. 6.2.4.2.2.3.1 Relación de la velocidad del sonido en el gas y en el aire, frente a la relación de la presión de rotura P_1 y la presión ambiente P_0 para diferentes valores de la presión escalada inicial. P_{S0} y $\gamma=1,4$

6.2.4.2.2.5 Determinación de la sobre presión 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').

6.2.4.3 Determinación del impulso escalado

Independientemente del método utilizado para calcular la sobrepresión escalada, el impulso escalado, i' , se determina con la grafica de la figura 6.2.4.3.1, para cada una de las distancias seleccionadas a través de los correspondientes valores de distancia escalada R' o d_n , obtenidos al principio



- Fig. 6.2.4.3.1 Impulso escalado (i') frente a la distancia escalada (R' o d_n) para el estallido de recipientes.

6.2.4.4 Ajuste de la sobrepresión escalada y del impulso escalado

En función del tipo de recipiente y de su situación respecto del suelo, es necesario realizar un ajuste de la sobrepresión y el impulso.

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 siguientes, que dependen de la geometría y ubicación de los recipientes.

R`	Factor multiplicador	
	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 6.2.4.4.1 Factores de ajuste para determinar la sobre presión escalada (P`) y el impulso escalado (i`) para recipientes cilíndricos

R`	Factor multiplicador (F)	
	Para P`	Para i`
<1	2	1,6
≥ 1	1,1	1

- Tabla 6.2.4.4.2 factor de ajuste para determinar la sobrepresión escalada (P') y el impulso escalado (i') para recipientes cercanos al suelo con ángulos inferiores a 15°

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.

6.2.4.5 Cálculo de la sobrepresión estática y del impulso

Corregidos los valores de P' e i' se calculan los valores de la sobrepresión estática (Ps en Pa) y del impulso mecánico de la onda (i, en Pa-s) producida en la explosión mediante:

$$P_s = (P' \cdot P_0) + P_0 \quad \text{Ecuación 6.2.4.5.1}$$

$$I = \frac{i' P_0^{2/3} E_{exp}^{1/3}}{C_0} \quad \text{Ecuación 6.2.4.5.2}$$

6.2.4.6 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_1), lo que es físicamente imposible. Mientras la sobrepresión estática supere a la de rotura debe tomarse $P_s = p_1$, lo que supone sobreestimar los resultados.

6.2.5 B 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 y corresponden a valores de la sobrepresión y del impulso escalado. Están definidos en el RD 1196/2003 por el que se aprueba la directriz básica de protección civil.

Para seleccionar el umbral correspondiente (sobrepresión o impulso) se utiliza la tabla 2.4.2.5.1, límites de sobrepresión e impulso.

	Límite zona de intervención	Límite zona de alerta
Sobre presión (bar)	0.125	0,05
Impulso (bar·s)	1,5	0,1
Alcance de fragmentos (bar ·s)	95 % con impulso superior a 0,01 bar · s	99% con impulso superior a 0,01

- Tabla 2.4.2.5.1 Límites de sobrepresión e impulso

El umbral seleccionado en la etapa anterior se transforma en su correspondiente escalado y se corrige dividiéndolo por los factores correspondientes de las tablas siguientes, tabla 6.2.5.1 y tabla 6.2.5.2, según corresponda.

	P'	\hat{i}
Zona de alerta	1,1	1
intervención con edificios	1,1	1
Intervención sin edificios	1,1	- - -

- Tabla 6.2.5.1 Factores de corrección de los umbrales escalados de presión e impulso para recipientes cercanos al suelo

	P`	i`
Zona de alerta	1,4	1
intervención con edificios	1,4	1
Intervención sin edificios	1,6	- - -

- Tabla 6.2.5.2 Factores de corrección de los umbrales escalados de presión e impulso para recipientes cilíndricos

6.2.5.1 Distancias escaladas de las Zonas de Planificación

Se determina la distancia escalada o normalizada (R' o d_n) correspondiente al umbral corregido del apartado anterior a partir de la figuras 6.2.4.2.1.1, y 6.2.4.3.1, gráfica distancia normalizada - sobrepresión normalizada. Para ($d_n < 2$) y grafica distancia normalizada o escalada – impulso.

6.2.5.2 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:

$$z = R' \left(\frac{E_{exp}}{P_0} \right)^{1/3} \quad \text{Ecuación 6.2.5.2.1}$$

7 ANEXO IV CÁLCULO DE LA PROYECCIÓN DE FRAGMENTOS

Cálculo de la proyección de fragmentos en explosiones se realiza a través del método Baker, aplicable a la explosión de recipientes.

7.1 Introducción

La explosión de los recipientes a presión, provoca la proyección de fragmentos que en muchas ocasiones alcanzan distancias considerables y causan daños importantes al impactar contra seres humanos, edificios o estructuras.

Para conocer el alcance de los fragmentos producidos en el estallido de recipientes, se utilizan resultados obtenidos en experimentos y accidentes reales, los cuales demuestran que, en general, la rotura de los recipientes y el número de fragmentos que se originan, depende de las causas que la producen y de la geometría del recipiente.

De forma general, es necesario estimar la velocidad inicial de los fragmentos, 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 (presión interior del recipiente y presión atmosférica o exterior).
- La otra es la producida por la presión dinámica, o viento de la explosión, que es consecuencia del impulso de la onda de presión.

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 o impulso.

La velocidad requerida para que un fragmento pueda penetrar en un depósito o recipiente similar es del orden de 4 a 12 m/s, y la velocidad máxima que pueden alcanzar los fragmentos de una explosión BLEVE, es del orden de 150 a 200 m/s.

7.2 Clasificación de los fragmentos

Los fragmentos se clasifican en dos categorías en función de su origen:

- Fragmentos primarios: son aquellos que están originados por la rotura del recipiente y pertenecen al mismo.
- Fragmentos secundarios: son aquellos que están originados por las ondas de presión, al actuar sobre todo aquello que encuentra a su paso. La formación de los fragmentos secundarios está considerado un efecto dominó, que según la definición establecida en el RD 1196/2003 por el que se aprueba la Directriz Básica de Protección Civil, es la concatenación de efectos causantes de riesgo que multiplica las consecuencias, que a su vez pueden provocar nuevos fenómenos peligrosos.

Se establece otra clasificación de los fragmentos, en función del daño que producen:

- Fragmentos penetrantes (que perforan y penetran en el cuerpo), como por ejemplo fragmentos de cristal.
- Fragmentos no penetrantes (que provocan daño por la presión del impacto), como por ejemplo fragmentos de escombros, ladrillos, etc.

7.3 Método de cálculo para estimar el alcance de los fragmentos

La estimación del alcance de los fragmentos originados en una explosión, puede llevarse a cabo mediante varios métodos dependiendo del tipo de explosión.

Los parámetros principales para el estudio de los fragmentos son:

- Cálculo de la sobrepresión e impulso de la onda de presión. (Siguiendo uno de los métodos descritos en los anexos I, II o III)
- Ubicación del fragmento
- Masa de los fragmentos desprendidos
- Dimensiones de los fragmentos.
- Cálculo de la velocidad inicial, aceleración y desprendimiento de los fragmentos.

La velocidad inicial es consecuencia de la aceleración provocada por dos fuerzas diferentes.

- Una fuerza debida a la diferencia de presiones (presión interior del recipiente y presión atmosférica o exterior).
- y otra fuerza originada por el impulso de la onda de presión.

7.3.1 Estimación del número y masa de los fragmentos

La siguiente tabla se muestra el número de fragmentos que se forman, en función del tipo de rotura y el tipo de recipiente.

Tipo de recipiente	Tipo de rotura	Numero de fragmentos (n_f)
Esferas	Debilitamiento material	2 desiguales
Cilindros	Debilitamiento material	2 a 5 desiguales
Esfera	Sobrepresión	3 a 19 ¹
Cilindros	Sobrepresión	Indefinido ²

- Tabla 7.3.1.1 Estimación del número de fragmentos

¹ Se forman fragmentos desiguales, preferentemente se toma el valor de 10 fragmentos

² Se forman fragmentos variados en número y tamaño (2 desiguales, 3 desiguales, 20 desiguales)

Para estimar la masa de los fragmentos, se toma como referencia la masa del recipiente (M_v). Según el tipo de rotura, y el tipo de recipiente, se establece la tabla siguiente, tabla 7.3.1.2.

Tipo de recipiente	Número de fragmentos (n_f)	Masa fragmentos M_f	Forma fragmentos
Esferas	2	$\frac{M_v}{2}$	plano
Esferas	5	$\frac{M_v}{5}$	plano
Cilindros	2 desiguales	uno M_{tapa}	semiesférico
		otro ($M_v - M_{tapa}$)	tanque sin tapa
Cilindros	3 fragmentos	2 partes M_{tapa}	semiesférico
		otro ($M_v - 2M_{tapa}$)	cuerpo sin tapas
Cilindros	Indefinido	2 partes M_{tapa}	Semiesférico
		El resto $\frac{(M_v - 2M_{tapa})}{n_f - 2}$	planos

- Tabla 7.3.1.2 Estimación de la masa y forma de los fragmentos

Una vez estimado el número de fragmentos y la masa de los mismos, según los diferentes tipos de estallido. Se continúa con el método de cálculo, determinando la velocidad inicial de los fragmentos.

7.3.2 Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos

Para realizar el cálculo de la velocidad de los fragmentos, se utilizan diferentes métodos, según el tipo de explosión, estos se representan en la siguiente tabla, tabla 7.3.2.1.

Tipo de explosión	Variables	Método de cálculo
BLEVE	Velocidad inicial	Baum (empírico)
Explosión interna	Velocidad inicial	Baker – Gelfand's
Reacción fuera de control	Velocidad inicial	Baker – Gelfand's
Recipiente con gas ideal	Velocidad inicial	Baker – Gelfand's
Descomposición de sustancias	Velocidad inicial	Moore
Cualquier origen excepto Reacción fuera de control	Velocidad inicial	Energía cinética

- Tabla 7.3.2.1 Diferentes métodos de cálculo.

7.3.2.1 Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos

El cálculo de la velocidad inicial, se realiza de forma diferente según el tipo de explosión sea para explosiones internas, reacciones fuera de control o 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 ecuación:

$$C_1^2 = \frac{T_g \gamma_1 R}{\mu_1} \quad \text{Ecuación 7.3.2.1}$$

Donde:

γ_1 : C_P / C_V del gas (adimensional). Para el caso del aire 1,4

T_g : Temperatura absoluta del gas comprimido (°K) tomamos 293 °K

μ_1 : Masa molecular del gas (kg/mol). Para el aire 28,8503 g/mol

R : Constante universal de los gases (8.314 J/(mol·K)).

- A continuación se calcula la sobrepresión escalada (P'_1 , adimensional) mediante la ecuación:

$$P'_1 = \frac{(p_1 - P_0)V_g}{M_v c_1^2} \quad \text{Ecuación 7.3.2.2}$$

Donde:

p_1 (Pa) es la presión absoluta en el interior del recipiente en el momento inmediatamente anterior al estallido.

P_0 (Pa) es la presión atmosférica.

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, se calcula mediante la ecuación:

$$\Phi = \frac{\Delta H_{exp} S_L}{C_1^3} \quad \text{Ecuación 7.3.2.3}$$

Donde:

ΔH_{exp} (J/kg) es la entalpía de la reacción explosiva o fuera de control.

S_L (m/s) la velocidad laminar de combustión

Una vez calculados los parámetros anteriores:

- Velocidad del sonido.
- Sobrepresión escalada.
- Φ en el caso de reacciones fuera de control.

Para poder determinar la velocidad inicial de los fragmentos (v_i) a partir del cociente v_i/c_1 , en función de la geometría del recipiente y del tipo de explosión, se selecciona la figura correspondiente de la siguiente tabla, tabla 7.3.2.1.

Tipo de recipiente	Tipo de explosión	Parámetro característico	Fig.	
Esférico	Gas ideal		Fig. 7.3.2.6	
	Reacción fuera de control o explosión interna	$\gamma_{1=1,7}$	Fig. 7.3.2.5	
		$\gamma_{1=1,4}$	Fig. 7.3.2.5	
		$\gamma_{1=1,1}$	Fig. 7.3.2.5	
Cilíndrico	Gas Ideal	$Lv/dv = 5$	Fig. 7.3.2.2	
		$Lv/dv = 10$	Fig. 7.3.2.1	
	Reacción fuera de control o explosión interna	$Lv/dv = 5$	$\gamma_{1=1,7}$	Fig. 7.3.2.3
			$\gamma_{1=1,4}$	Fig. 7.3.2.3
			$\gamma_{1=1,1}$	Fig. 7.3.2.3
		$Lv/dv = 10$	$\gamma_{1=1,7}$	Fig. 7.3.2.4
			$\gamma_{1=1,4}$	Fig. 7.3.2.4
			$\gamma_{1=1,1}$	Fig. 7.3.2.4

- Tabla 7.3.2.1 Selección de la figura a utilizar en función de la geometría del recipiente, el tipo de estallido y los parámetros característicos. L_v y d_v que son la longitud y diámetro del cilindro, respectivamente.

7.3.2.2 Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos (BAUM)

Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos con el método de Baum (para el caso de BLEVE o estallidos con poca información).

La velocidad inicial de los fragmentos puede ser calculada usando la siguiente ecuación:

$$v_i = \sqrt{\frac{2 \cdot A_{ke} E_{av}}{M_v}} \quad \text{Ecuación 7.3.2.2.1}$$

Donde:

V_i es la velocidad inicial de los fragmentos

E_{av} es la energía liberada (J)

M_v es la masa total del recipiente (kg)

A_{ke} es la fracción de la energía liberada que es función de la energía cinética de los fragmentos, que además depende de la situación.

La energía cinética comunicada a los fragmentos es una fracción (A_{ke}) de la energía total liberada (E_{av}), esto es:

$A_{ke} = 0,6$ Límite superior

$A_{ke} = 0,2$ Cálculo aproximado

$A_{ke} = 0,04$ Bleve

7.3.2.3 Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos (MOORE)

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 de las velocidades que resulte de los cálculos, ya que el método de Moore suele sobreestimar la velocidad por lo que, en general, se toma la velocidad 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, teniendo en cuenta que M_v es la masa de los fragmentos y M_c la masa del gas contenido en el recipiente.

$$v_i = 1,092 \left(\frac{E_{av} A_M}{M_v} \right)^{1/2} \quad \text{Ecuación 7.3.2.3.1}$$

Donde:

A_M para recipientes esféricos es:

$$A_M = \frac{1}{1 + 3M_c/5M_v} \quad \text{Ecuación 7.3.2.3.2}$$

A_M para recipientes cilíndricos es:

$$A_M = \frac{1}{1 + M_c/2M_v} \quad \text{Ecuación 7.3.2.3.3}$$

Siendo la masa del gas contenido en el recipiente M_c que se calcula a través de la ecuación:

$$M_c = \frac{p_1 V_g}{T_g R} \cdot \mu_1 \quad \text{Ecuación 7.3.2.3.4}$$

Donde:

V_g volumen del gas

T_g temperatura del gas en °K

R constante de los gases 8,31

μ_1 peso molecular del gas

7.3.2.4 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.

7.3.3 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:

$$v_i^* = \frac{\rho_0 C_D A_D v_i^2}{M_f g} \quad \text{Ecuación 7.3.3.1}$$

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 $C_D A_D$, se denomina factor de rozamiento, depende del tamaño y forma del fragmento y de su posición durante el vuelo, indicándose en la tabla siguiente, tabla 7.3.2.4.1, 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.

Fragmento	$C_D A_D$ (m ²)
Plano	$0,585 \cdot A_{\text{fragmento}}$
Semiesférico	$0,615 \cdot \frac{\pi}{4} d_v^2$
Alargado	$0,99 \cdot A_{\text{fragmento}}$
Cilíndrico	$1,20 \cdot d_v \cdot L_v$

- Tabla 7.3.3.1 Factor de rozamiento $C_D A_D$ para diferentes tipos de fragmentos

$A_{\text{fragmento}}$ (m²) es el área exterior o de una de las caras (para los de forma plana o alargada) y d_v L_v (m) el diámetro o longitud del recipiente.

7.3.4 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 no hay modelos que permitan determinar las consecuencias con suficiente aproximación. Se ha propuesto la siguiente ecuación para estimar la penetración de un fragmento (J , m) en diversos materiales:

$$J = \frac{CM_f}{A_{\text{fragmento}}} \log(1 + 5 \cdot 10^{-5} v_i^2) \quad \text{Ecuación 7.3.4.1}$$

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, en la tabla siguiente, tabla 7.3.4.1, se establecen los valores de C , para diferentes materiales.

Material	C (m^3/kg)
Cemento reforzado	$3,5 \cdot 10^{-4}$
Ladrillo	$25 \cdot 10^{-4}$
Acero	$0,5 \cdot 10^{-4}$

- Tabla 7.3.4.1 Valores de C para distintos materiales.

7.3.5 El impulso mecánico de los fragmentos

Para calcular el los valores límite de las Zonas de Planificación, se toman como base, el impulso mecánico de los fragmentos.

Se relacionan el impulso con la superficie y las 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:

$$i = \frac{M_f}{A_{\text{fragmento}}} v_i \quad \text{Ecuación 7.3.5.1}$$

$$M_f = \rho_f e_f v_i \quad \text{Ecuación 7.3.5.2}$$

Donde

Siendo e_f el espesor del fragmento

ρ_f su densidad.

Si se combinan las dos ecuaciones anteriores, se obtiene una nueva ecuación, donde el impulso mecánico es:

$$i = \rho_f e_f A_{\text{fragmento}} v_i \quad \text{Ecuación 7.3.5.3}$$

Si además se considera la ecuación de la energía cinética (E_c) inicial de los fragmentos, nos permite calcular la fracción de energía total que se transfiere en el momento de la explosión como energía mecánica a cada uno de los fragmentos generados.

$$E_c = \frac{1}{2} M_f v_i^2 \quad \text{Ecuación 7.3.5.4}$$

Con ello se puede disponer de la siguiente información:

- Energía liberada en el momento de la rotura.
- Energía inicial en el momento de la rotura.
- Número de fragmentos formados (masa, dimensiones e incluso forma)
- Velocidad inicial de los fragmentos
- Distancia alcanzada por los fragmentos
- Impulso y la energía cinética.
- Penetración de los fragmentos.

8 ANEXO V EJEMPLO DE CÁLCULO MEDIANTE EL MÉTODO DEL TNT EQUIVALENTE, APLICÁNDOLO AL ESTALLIDO DE UN RECIPIENTE A PRESIÓN DEBIDO A FALLOS DE MATERIAL

La secuencia de actuación es la siguiente:

1. Determinar. la energía liberada en la explosión.
2. Determinar la eficiencia de la explosión y masa del TNT equivalente.
3. Determinar el cálculo de la sobrepresión e impulso a determinadas distancias.
4. Alcance de la zona de intervención.
5. Alcance de la zona de alerta.
6. Evaluación de los resultados.

8.1 Energía liberada en la explosión de un gas considerado este como gas ideal

La energía liberada en el momento de la explosión se calcula para el caso de un gas ideal, a través de la siguiente ecuación.

$$E_{av} = \frac{(P_1 - P_0)V_g}{\gamma_1 - 1} \quad \text{Ecuación 4.2.4.1}$$

Presión exterior (Pa)	Presión Interior (Pa)	Volumen (m ³)	Energía Liberada (J)
101325	30000000	0,012	896960,25

8.2 Eficiencia de la explosión y masa de TNT equivalente

Como ejemplo de cálculo se toman diferentes valores de α .

El peso equivalente de TNT se calcula a partir de la ecuación:

$$W_{TNT} = \alpha \frac{E_{exp}}{E_{mTNT}} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Donde:

E_{mTNT} calor de combustión del TNT que tiene un valor de $4,6 \cdot 10^6$ J/Kg

α es el rendimiento de la explosión que se estima en 0,5

En la tabla siguiente, tabla 8.2.1 se ha calculado el peso de TNT equivalente (W_{TNT}) para un equipo de respiración autónomo, tomando valores de α (eficiencia de la explosión) diferentes.

Tipo de sustancia Considerada	Eficiencia explosión α	W_{TNT} Equivalente (kg) Equipo Respiración
Nubes de vapor	0,01	0,001949914
	0,02	0,003899827
	0,03	0,005849741
	0,04	0,007799654
Recipientes a presión	0,2	0,038998272
	0,3	0,058497408
	0,4	0,077996543
	0,5	0,097495679
Sustancias explosivas	1	0,194991359

- Tabla 8.2.1 Valores de W_{TNT} para valores de α

8.3 Determinación del cálculo de la sobrepresión e impulso a determinadas distancias

Una vez obtenidos los diferentes valores del W_{TNT} equivalente (kg) correspondientes a diferentes valores de α , se toma el correspondiente a $\alpha = 0,5$ a efectos de cálculo, para poder calcular los valores de la sobrepresión e impulso correspondientes para diferentes distancias. Para ello es necesario calcular la distancia escalada a diferentes distancias reales a las que se quiere conocer los valores de sobrepresión e impulso.

La distancia normalizada o escalada, se calcula mediante la expresión:

$$d_n = \frac{d}{\sqrt[3]{W_{TNT}}} \quad \text{Ecuación 4.2.10.1}$$

Una vez calculada la distancia normalizada (d_n) se calcula la sobrepresión (ΔP) a través de la figura 4.2.10.1 y el impulso escalado o normalizado se calcula a través de la figura 4.2.10.2.

Una vez conocido el impulso escalado, el impulso se calcula a través de la ecuación:

$$\dot{i} = i \cdot W_{TNT}^{1/3} \quad \text{Ecuación 4.2.10.2}$$

En la tabla siguiente, tabla 8.3.1, se muestran los resultados de la sobrepresión e impulso así como de la duración de la fase positiva para diferentes distancias del origen de la explosión, en el caso de un recipiente de respiración autónomo.

Distancia Real en (m)	Distancia escalada dn	Pico de sobrepresión (bar)	Impulso escalado i'	Impulso i (bar.s)	Duración escalada	Duración de la fase positiva (s)
5	10,8636279	0,15	6,5	2,99163413	3,5	1,610879919
10	21,7272558	0,06	3,3	1,51882964	4,5	2,071131324
20	43,4545115	0,032	0,9	0,41422626	6,3	2,899583854
30	65,1817673	0,022	0,7	0,32217598	6,5	2,991634135
40	86,9090231	0,02	0,6	0,27615084	6,8	3,129709556

- Tabla 8.3.1 Resultado de la sobrepresión, impulso y duración.

8.4 Alcance para el valor umbral de la zona de intervención

Se ha establecido que la sobrepresión máxima es de 12500 Pa ó 0,125 bar

Utilizando la grafica de la figura 4.2.10.1, se obtiene que la relación con la distancia escalada es, $dn = 12,5$, que se corresponde aplicando la ecuación 4.2.10.1, con una distancia de 5,75 metros.

8.5 Alcance para el valor umbral de la zona de alerta

Se ha establecido que la sobrepresión máxima es de 5000 Pa ó 0,05 bar

Utilizando la gráfica de la figura 4.2.10.1, se obtiene que la relación con la distancia escalada es, $dn = 24$, que se corresponde aplicando la ecuación 4.2.10.1, a una distancia de 11,04 metros.

Para los valores de $dn > 2$, el cálculo de la sobrepresión tiene que realizarse a través de la grafica de la figura 6.2.4.2.1.1.

En la tabla siguiente, tabla 9.1.2.1 se observan los resultados correspondientes:

Distancia en metros	Distancia escalada dn para equipo de respiración autónomo	Sobrepresión ΔP
2	0,767363496	0,7
3	1,151045244	0,3
4	1,534726992	0,18
5	1,918408739	0,15
10	3,836817479	0,05
20	7,673634958	0,025
30	11,51045244	0,015
40	15,34726992	0,01
50	19,18408739	0,008
60	23,02090487	0,0065
70	26,85772235	0,006
100	38,36817479	0,003

- Tabla 9.1.2.1 Sobrepresión a diferentes distancias

En el caso de valores de $dn < 2$, es decir para distancias próximas al origen, en este caso las distancias comprendidas entre los 2 y 10 metros, se han calculado, también su sobrepresión con la grafica anterior, para poder comparar los resultados, con las que realmente deben salir del método Baker refinado con el que deben de calcularse.

9.1.2.1 Cálculo de sobrepresión para distancias próximas al origen

Para el cálculo de la sobrepresión de las distancias próximas al origen de la explosión, se calculan los siguientes parámetros.

9.1.2.2 Cálculo de la relación de la velocidad del sonido con el gas comprimido y el aire

Se calcula la relación de la velocidad del sonido en el gas comprimido y en el aire.

En el caso de un gas ideal, se calcula a través de la siguiente ecuación.

$$\left(\frac{c_1}{c_0}\right)^2 = \frac{\gamma_1 T_g \mu_a}{\gamma_a T_a \mu_1} \quad \text{Ecuación 6.2.4.2.2.1}$$

En este caso al tratarse de aire, el fluido contenido en el recipiente, la relación de velocidades es 1.

9.1.2.3 Cálculo de la distancia inicial

Suponiendo la rotura de un recipiente semiesférico, situado en el suelo, se calcula el radio del recipiente semiesférico, equivalente al volumen de gas contenido en el recipiente real, a través de la siguiente ecuación.

$$r_0 = \left(\frac{3V_g}{2\pi} \right)^{\frac{1}{3}} = 0,782 V_g^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ecuación 6.2.4.2.2.1}$$

Por tanto $r_0 = 0,179 \text{ m}$

Para transformar esta distancia r_0 en la distancia escalada dn_0 , se utiliza la ecuación siguiente.

$$d_{n0} = r_0 \left(\frac{P_0}{E_{exp}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ecuación 6.2.4.2.2.2}$$

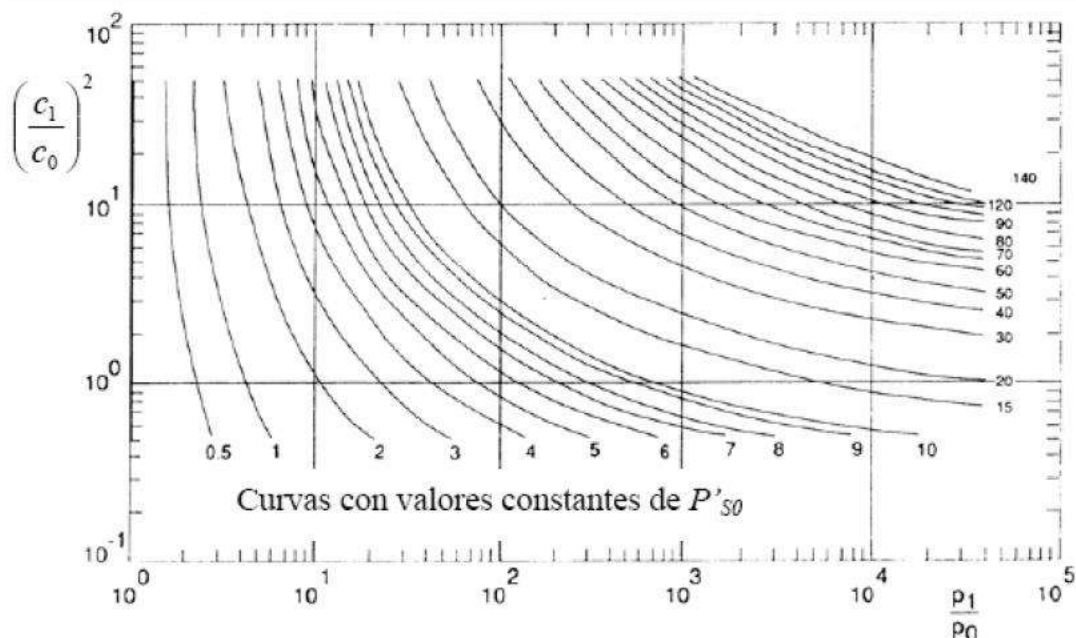
Siendo el valor de $dn_0 = 0,1479$

9.1.2.4 Cálculo de la sobrepresión escalada inicial P'_{s0}

Se calcula la sobrepresión escalada en el momento justo después de la explosión. Para el cálculo de la sobrepresión escalada, se utiliza la relación de velocidades del sonido en el gas en el interior del recipiente y en el aire, así como la relación de presiones en el interior del recipiente y en la exterior.

Siendo además la sobrepresión escalada $P'_{s0} = \left(\frac{p_{s0}}{p_a} \right) - 1$

Relación de velocidades $(C_1/C_2)^2$ y (P_1/P_0) utilizando la grafica de la figura 6.2.4.2.3.1



- Figura 6.2.4.2.3.1 Relación de la velocidad del sonido en el gas y en el aire, frente a la relación de la presión de rotura P_1 y la presión ambiente P_0 para diferentes valores de la presión escalada inicial. P'_{s0} y $\gamma=1,4$

En este caso se obtiene un valor de $P'_{s0} = 8$ que es 37,5 veces menor que la presión inicial en el interior del recipiente.

9.1.2.5 Localización del punto de partida

Localización del punto de partida la grafica de la figura 6.2.4.2.2.4.1 entrando en la grafica con los valores de dn_0 y P_{s0} calculados hasta ahora, lo que conseguimos es seleccionar la curva que marcará el corte de las coordenadas, en la grafica de la figura 6.2.4.2.2.4.1.

Nuevamente, calculamos los valores de distancia escalada para valores cercanos a la explosión, que son lo que se indican en la tabla siguiente:

Distancia en metros	Distancia escalada dn para equipo de respiración autónomo	Sobrepresión escalada calculada con el método general	Sobrepresión escalada calculada con el método refinado
2	0,767363496	0,7	1
3	1,151045244	0,3	0,55
4	1,534726992	0,18	0,35
5	1,918408739	0,15	0,19

- Tabla 9.1.2.5.1 Comparación de valores de sobrepresión.

Se observa que los valores de la sobrepresión escalada calculados con el método refinado, son superiores a los calculados con el método general.

9.1.3 Cálculo del impulso escalado

Una vez se ha calculado la distancia escalada dn y la sobrepresión escalada, independientemente por el método que sea, se calcula el impulso escalado, a partir de la grafica de la figura 6.2.4.3.1

Distancia en metros	Distancia escalada dn	Impulso escalado
2	0,767363496	0,07
3	1,151045244	0,05
4	1,534726992	0,035
5	1,918408739	0,025
10	3,836817479	0,015
20	7,673634958	0,007
30	11,51045244	0,0047
40	15,34726992	0,0035
50	19,18408739	0,0025
60	23,02090487	0,0021
70	26,85772235	0,0018
100	38,36817479	0,0012

- Tabla 9.1.3.1 Resultado del impulso escalado.

9.1.4 Ajuste la presión y el impulso escalados

Una vez obtenidos los valores de sobrepresión e impulso escalados, a la distancia correspondiente, se tiene que realizar el ajuste de de ambos valores en función de la geometría y de la posición del recipiente, para lo cual, se es necesario aplicar los factores de corrección de la tabla 6.2.4.3.1 y la tabla 6.2.4.2.2, en el caso de recipientes cilíndricos y cercanos al suelo, quedando los resultados de presión e impulso escalados, como se indica en la tabla siguiente:

Distancia en metros	Distancia escalada dn para equipo de respiración autónomo	Corrección de presión escalada	Corrección de impulso escalado
2	0,767363496	3,2	0,1232
3	1,151045244	0,968	0,0605
4	1,534726992	0,616	0,04235
5	1,918408739	0,3344	0,0275
10	3,836817479	0,077	0,0165
20	7,673634958	0,0385	0,0077
30	11,51045244	0,0231	0,00517
40	15,34726992	0,0154	0,00385
50	19,18408739	0,01232	0,00275
60	23,02090487	0,01001	0,00231
70	26,85772235	0,00924	0,00198
100	38,36817479	0,00462	0,00132

- Tabla 9.1.4.1 Ajuste de presión e impulso escalados

9.1.5 Cálculo de la sobrepresión estática y del impulso

Una vez se han calculado y corregido los valores de la sobrepresión escalada y del impulso escalado, se calculan los valores de la sobrepresión estática, a través de las ecuaciones:

$$P_S = P' \cdot P_0 \quad \text{Ecuación 6.2.4.5.1}$$

Y

$$I = \frac{i P_0^{2/3} E^{1/3}}{C_0} \quad \text{Ecuación 6.2.4.5.2}$$

Para las diferentes distancias, el cálculo queda como se muestra en la tabla siguiente:

Distancia en metros	Distancia escalada dn	Sobrepresión estática (bar)	Impulso estático (bar ·s)
2	0,767363496	3,24	0,00095
3	1,151045244	0,98	0,00046
4	1,534726992	0,62	0,00032
5	1,918408739	0,33	0,00021
10	3,836817479	0,078	0,00012
20	7,673634958	0,031	0,00005
30	11,51045244	0,023	0,00004
40	15,34726992	0,015	0,00002
50	19,18408739	0,012	0,00002
60	23,02090487	0,0101	0,00001
70	26,85772235	0,009	0,00001
100	38,36817479	0,004	0,00001

- Tabla 9.1.5.1 Sobrepresión estática e impulso

Los datos de sobre presión se comparan con los de las tablas 2.3.9.3.1.2, 2.3.9.3.1.3, y 2.3.9.3.1.4 para estimar los daños

9.1.6 Evaluación de los resultados

En la siguiente tabla se determina el nivel de daño para el caso de la explosión de un equipo de respiración autónomo a las distancias reales estudiadas.

Distancia m	Sobrepresión ΔP (bar)	Nivel de daño
2	3,24	Destrucción total de las estructuras Mortandad de más del 1% de las personas que se encuentren en el área
3	0,98	Demolición total de las estructuras. Posibilidad de muerte por daños pulmonares a las personas.
4	0,62	Destrucción total de las estructuras. Rotura de tímpano en las personas.
5	0,33	Destrucción parcial de estructuras.
10	0,078	Cristales rotos en un 100% y bastidores de ventanas arrancados Daños estructurales graves. Techos y paredes destruidos
20	0,031	Cristales rotos en más de un 50 %
30	0,023	Cristales rotos en más de un 50 %
40	0,015	Cristales rotos en más de un 50 %
50	0,012	Cristales rotos en más de un 50 %
60	0,010	Cristales rotos en más de un 50 %
70	0,009	Cristales grandes rotos
100	0,004	Rotura de vidrios por causa del ruido

- Tabla 9.1.6.1 Consecuencias de la sobrepresión

Observando los datos, se puede determinar que a una distancia de entre los 5 y 10 metros se producen daños moderados según se observa en la tabla 2.3.9.3.1.4. Lo cual se puede comprobar calculando las distancias de las zonas de intervención y alerta, lo cual se hace de forma análoga que en el método del TNT.

9.1.7 Alcance para el valor umbral de la zona de intervención

Se ha establecido que la sobrepresión máxima es de 12500 Pa ó 0,125 bar

Mediante la ecuación 6.2.4.5.1 se obtiene la sobrepresión escalda, con un valor de 0,12, eliminado los factores de corrección, resulta una presión escalda de 0.07 y utilizando la grafica de la figura 6.2.4.2.1.1, se obtiene que la relación con la distancia escalada es, $dn = 3$, que se corresponde aplicando la ecuación 6.2.4.1.1 a una distancia de 7,8 metros.

9.1.8 Alcance para el valor umbral de la zona de alerta

Se ha establecido que la sobrepresión máxima es de 5000 Pa ó 0,05 bar

Mediante la ecuación 6.2.4.5.1 se obtiene la sobrepresión escalda, con un valor de 0,0493 eliminado los factores de corrección, resulta una presión escalda de 0.028 y utilizando la grafica de la figura 6.2.4.2.1.1, se obtiene que la relación con la distancia escalada es, $dn = 9$, que se corresponde aplicando la ecuación 6.2.4.1.1 a una distancia de 23,45 metros.

10 ANEXO VII EJEMPLO DE CÁLCULO DE LA PROYECCIÓN DE FRAGMENTOS

Las condiciones de partidas, son las iniciales, se trata de un cilindro que estalla por debilidad estructural, por lo que se estima que se forman dos fragmentos desiguales, siendo la tapa del recipiente, de forma semiesférica la que se considera para el alcance máximo.

10.1.1 Características del recipiente

M_v = masa del recipiente = 14 kg

M_{tapa} = masa de la tapa

Para calcular la masa del fragmento, se estima la densidad superficial (ρ) en 90 kg/cm²

Dimensiones del recipiente:

$h = 0,60$ m

$\Phi = 0,18$ m

Superficie del recipiente: $(2 \cdot \pi \cdot r \cdot h + 2 \cdot \pi \cdot r^2) = 0,39\text{m}^2$

10.1.2 Estimación del número de los fragmentos

En el caso que nos ocupa, según lo indicado en la tabla 7.3.1.1

- Tipo de recipiente: Cilindro
- Tipo de rotura: debilitamiento de material
- Número de fragmentos n_f 2 a 5

10.1.3 Estimación de la masa de los fragmentos

Según lo indicado en la tabla 7.3.1.2

- Masa de los fragmentos para $n_f = 2$

Uno M_{tapa}

Otro $M_v - M_{tapa}$

$$M_f = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{\Phi}{2}\right)^2 \rho = 4,48 \text{ kg}$$

10.1.4 Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos

El primer cálculo para determinar la velocidad inicial de los fragmentos se realiza con el método de energía cinética.

A través de la ecuación 4.2.4.1 se ha calculado la energía contenida en el gas comprimido para el caso de rotura de recipientes debidas a fallos de material

$$E_{av} = \frac{(P_1 - P_0)V_g}{\gamma_1 - 1} \quad \text{Ecuación 4.2.4.1}$$

Donde sustituyendo, resulta que: $E_{av} = \frac{(3E7 - 101325)0,012}{1,4 - 1} = 897,98 \text{ MJ}$

Una vez calculada la energía del gas, a través de la ecuación 7.3.2.2.1 se calcula la velocidad inicial de los fragmentos.

$$v_i = \sqrt{\frac{2 \cdot A_{ke} E_{av}}{M_v}} \quad \text{Ecuación 7.3.2.2.1}$$

Considerando que la energía cinética comunicada a los fragmentos es una fracción (A_{ke}) de la energía total liberada (E_{av}), se toma un valor de $A_{ke}=0,2$, resultando un valor de la velocidad inicial de los fragmentos de:

$$v_i = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,2 \cdot 8,97 \cdot 10^5}{14}} = 141 \text{ m/s.}$$

Según el tipo de explosión que se indica en la tabla 7.3.2.1 para recipientes con gas ideal el método de cálculo de la velocidad inicial debería de ser el Baker – Gel'fand's

Por lo que, a través de la ecuación 7.3.2.1 se determina la velocidad del sonido en el gas comprimido en el momento inmediatamente antes del estallido del recipiente.

$$C_1^2 = \frac{T_g \gamma_1 R}{\mu_1} \quad \text{Ecuación 7.3.2.1}$$

$$C_1 = \sqrt{\frac{293 \cdot 1,4 \cdot 831451,51}{28}} = 343,82 \text{ m/s}$$

10.1.5 Calculo de la sobrepresión escalada adimensional

Mediante la ecuación 7.3.2.2 se calcula la sobrepresión escalada.

$$P^*_1 = \frac{(p_1 - p_0) V_g}{M_v c_1^2} \quad \text{Ecuación 7.3.2.2}$$

$$P^*_1 = \frac{(3E7 - 101325) \cdot 0,012}{14 \cdot 349,82^2} = 0,20$$

Resultando un valor de la presión escalada de 0,20

La relación entre la longitud (L_v) y el diámetro (d_v) es de 3,3 y dado que se trata de un recipiente con gas ideal se emplea la grafica de $\left(\frac{L_v}{d_v}\right)$ 5 por ser la más cercana.

Utilizando la grafica de la figura 7.3.2. se obtiene para $\gamma=1.4$, relación de $\left(\frac{L_v}{d_v}\right)$ 5 y un valor de P_1 escada de 0,20, que resulta una relación de velocidades de (v_i/c_i) es de 0.25

Por lo tanto la velocidad inicial de los fragmentos, resulta de:

$(v_i/343,82)= 0,25$ por lo que despejando se obtiene un valor de $v_i= 0,25 \times 343,82 = 85,95$ m/s

10.1.6 Comprobación de la velocidad inicial obtenida

Se tiene que comprobar la velocidad inicial obtenida, seleccionando la mejor de las velocidades, para ello se utiliza el cálculo de la velocidad inicial con el método Moore, a través de la ecuación 7.3.2.3.1, y 7.3.2.3.2 se calcula la velocidad inicial.

$$v_i = 1,092 \left(\frac{E_{av} A_M}{M_v} \right)^{1/2} \quad \text{Ecuación 7.3.2.3.1}$$

Sustituyendo valores, se obtiene que:

La masa total de aire dentro del recipiente es, según la ecuación 7.3.2.3.4

$$M_C = \frac{3 \cdot 10^7 \cdot 0,012}{293 \cdot 8,31} \times 28,85 \cdot 10^{-3} = 4,26559 \text{ kg}$$

El valor de A_M es según la ecuación 7.3.2.3.3

$$A_M = \frac{1}{1 + 4,265/2 \cdot 14} = 0,86$$

$$v_i = 1,092 \sqrt{\left(\frac{8,97 \cdot 10^5 \cdot 0,86}{14} \right)} = 257,92 \text{ m/s}$$

Como se puede observar este valor es mucho mayor que el obtenido con el método anterior, por lo que no es necesario aplicar ningún tipo de corrección y se toma como correcto el calculado con el método correspondiente Baker – Gel'fand's de donde había resultado una velocidad de 85,95 m/s

10.1.7 Calculo del alcance máximo

Con la velocidad determinada anteriormente, de 85,95 m/s se determina ahora a través de la ecuación 7.3.3.1 la velocidad escalada, para los fragmentos

$$v_i = \frac{\rho_0 C_D A_D v_i^2}{M_f g} \quad \text{Ecuación 7.3.3.1}$$

El producto $C_D A_D$ se considera de la tabla 7.3.3.1 siendo este:

$$C_D A_D = 0,615 \cdot \frac{\pi}{4} d_v^2 = 0,00391$$

A través de la ecuación 7.3.3.1 se obtiene la velocidad escalada.

$$v_i = \frac{1,2 \cdot 0,00391 \cdot 85,95^2}{4,48 \cdot 9,81} = 0,73$$

Una vez calculada la velocidad escalada, a través de la grafica de la figura 7.3.3.1, se determina el alcance escalado de los fragmentos.

Resultando un valor de la distancia del alcance escalado de 0,6.

Este valor se transforma en distancia real del alcance de los fragmentos a través de la ecuación 7.3.3.2

$$R_f = R_f' \cdot \frac{M_f}{\rho_0 C_D A_D} \quad \text{Ecuación 7.3.3.2}$$

Resultando un valor del alcance de los fragmentos de:

$$R_f = 0,6 \cdot \frac{4,48}{1,2 \cdot 0,00391} = 572,89 \text{ m}$$

El alcance máximo del fragmento semiesférico es de 572,89 m