



**Universitat de les  
Illes Balears**

**TESIS DOCTORAL  
2014**

**EL PROGRAMA INFORMATICO APPO Y SU  
APLICACION A LOS ACCIDENTES DE  
MERCANCIAS PELIGROSAS DERIVADAS DEL  
PETROLEO**

**José María Natta March**





**Universitat de les  
Illes Balears**

**TESIS DOCTORAL  
2014**

**Programa de Doctorado en Ciencia y Tecnología  
Química**

**EL PROGRAMA INFORMATICO APPO Y SU  
APLICACION A LOS ACCIDENTES DE  
MERCANCIAS PELIGROSAS DERIVADAS DEL  
PETROLEO**

**José María Natta March**

**Director/a: José Ramón Bergueiro López**

**Tutor/a: José Manuel Estela Ripoll**

**Doctor/a por la Universitat de les Illes Balears**





EL PROGRAMA  
INFORMÁTICO  
**APPO**

Y SU APLICACIÓN  
A LOS ACCIDENTES  
DE MERCANCÍAS  
PELIGROSAS  
DERIVADAS  
DEL PETRÓLEO

José María Natta March



A mi madre Francisca

A mi esposa e hijos Magdalena, Josep y Laura



El Dr. José Ramón Bergueiro López, Profesor Titular de Ingeniería Química de la Universitat de les Illes Balears,

### **CERTIFICA**

Que el presente trabajo de investigación titulado “El programa informático APPO y su aplicación a los accidentes de mercancías peligrosas derivadas del petróleo”, que presenta José M<sup>a</sup> Natta March para aspirar al grado de Doctor en Ciencias Químicas, ha sido realizada bajo su dirección en la Universitat de les Illes Balears.

Que considerándolo como concluido, autoriza su presentación a fin de que pueda ser juzgado por el tribunal correspondiente.

Palma de Mallorca, 2.014

Firmado  
Dr. José Ramón Bergueiro López  
Profesor titular de la UIB.



Sin lugar a dudas, como todos los trabajos de investigación, esta tesis no habría sido posible sin la ayuda, asesoramiento, colaboración y apoyo de un gran número de personas a las que quiero expresar mi más sincero agradecimiento:

Al Dr. José Ramón Bergueiro López, por su magnífica dirección de esta tesis, la cual sin sus conocimientos, intuición, asesoramiento, experiencia y ayuda no habría sido posible. También agradecerle de todo corazón el gran apoyo y el inmejorable trato personal que he recibido de su parte durante estos años.

Al Dr. Juan Jesús Fiol Arbós y a la Dra. Josefa Donoso Pardo, por el apoyo y motivación que me han dado estos últimos meses en los ensayos del coro de cámara Musicantes de Mallorca.

A mis compañeros Josep Campins y Kika Sánchez, por su grata compañía y apoyo durante todos estos años. Por los buenos momentos que juntos hemos, y seguiremos pasando en el laboratorio de destil·leries ANTONIO NADAL SA.

A todos vosotros y todas las personas que ha formado parte de mi vida y de esta tesis, MUCHAS, MUCHAS GRACIAS.





**Indice**







## INDICE

### Antecedentes

### Objetivos

#### 1. Materias Peligrosas

1.1 Materias peligrosas, definición	3
1.2 Clasificación de las materias peligrosas	5
1.3 Identificación de las materias peligrosas	13

#### 2. Producción y transporte de materias peligrosas. Accidentes y estadísticas.

2.1 Introducción	33
2.2 Localización de los más importantes centros de producción	35
2.3 Accidentes en el transporte de materias peligrosas por vía terrestre	37
2.4 Conclusiones significativas	39

#### 3. Balance de energía mecánica

3.1 Introducción	43
3.2 Balance de energía mecánica	45
3.3 Los efectos friccionales $\Sigma F$ y el factor de fricción de Fanning $f_F$	51
3.4 La longitud equivalente $L_{eq}$ en los efectos friccionales $\Sigma F$	55



#### **4. Derrame de líquidos procedentes de tanques no presurizados**

4.1 Introducción	59
4.2 Derrames y balance de energía mecánica	63
4.3 Determinación de la velocidad de un derrame $u_1$	69
4.4 Coeficiente de descarga $C_d$	73
4.5 Estimación del tiempo de derrame	75
4.6 Cálculos experimentales 83	83

#### **5. Derrame de gases procedentes de tanques presurizados**

5.1 Introducción	103
5.2 Riesgos principales de los gases y los GLP	107
5.3 Flujo compresible de gases	113
5.4 Flujo adiabático a través de una boquilla	115
5.5 Vaciado de un depósito	117
5.6 El número de Mach	121
5.7 Velocidad en función del número de Mach	123
5.8 Flujo obstruido	125
5.9 Presión $P_0^*$ a la que el flujo es obstruido	127
5.10 Vaciado de depósitos en flujo obstruido: $u_1^*$ , $G^*$ , $Q_M^*$	129
5.11 Tiempo de derrame	131
5.12 Cambio de temperatura en un derrame con flujo obstruido	133
5.13 NTP 385: Fugas en recipientes – emisión en fase gaseosa	135
5.14 Cálculos experimentales	141



## **6. Derrame de líquidos procedentes de tanques presurizados**

6.1 Introducción	149
6.2 El balance de energía mecánica	153
6.3 Determinación de la velocidad de derrame $u_1$	155
6.4 Estimación del tiempo de derrame	157
6.5 El modelo de Fauske para gases licuados	165
6.6 Caudal másico del derrame de un gas licuado $Q_M$	167
6.7 Caudal másico del derrame de un gas licuado $Q_M$ [NTP 326]	169
6.8 Derrame de la fase gaseosa de un gas licuado. Flujo obstruido	171
6.9 Derrame de la fase gaseosa de un gas licuado. Flujo no obstruido	175
6.10 Cálculos experimentales	177

## **7. Evaporación de líquidos inflamables y gases licuados derramados**

7.1 Introducción	189
7.2 Estimación del área de un derrame	191
7.3 Evaporación de líquidos derramados	193
7.4 Flujo de evaporación de líquidos inflamables derramados	197
7.5 Flujo de vaporización de líquidos muy volátiles derramados	203
7.6 NTP 430: Gases licuados, evaporación de fugas y derrames	205
7.7 Tiempos de vaporización	213
7.8 Cálculos experimentales	215



## 8. Combustión de líquidos derramados y radiación térmica

8.1 Introducción	235
8.2 Clasificación de líquidos inflamables y combustibles	237
8.3 Energía necesaria para la ignición de vapores	241
8.4 Incendio de un derrame y velocidad de quemado $v_0$	243
8.5 Incendio de un derrame; radiación térmica $q$	247
8.6 Poder emisor de las llamas $PE$ o radiación térmica $q$ en el incendio de un derrame. Fórmulas aproximadas	261
8.7 Modelos de vulnerabilidad. Método "Probit"	265
8.8 Métodos de prevención de incendios	273
8.9 Radiación térmica, criterio de daños	277
8.10 Cálculos experimentales	279

## 9. BLEVE. Bolas de fuego

9.1 Introducción	287
9.2 Termodinámica de la BLEVE	293
9.3 Magnitud de una BLEVE	307
9.4 Parámetros de las bolas de fuego en una explosión BLEVE	309
9.5 Nivel y distancia de seguridad	315
9.6 Cálculos experimentales	321

## 10. Chorros de fuego. Jet flame

10.1 Introducción	279	331
10.2 Longitud de la llama en forma de chorro. Algoritmos	281	333



10.3 Ecuaciones de conservación	285	337
10.4 Radiación de la llama según CHARM	287	339
10.5 Cálculos experimentales	289	343
<b>11. Explosiones</b>		
11.1 introducción		351
11.2 factores que influyen en una explosión		355
11.3 explosión de nubes de vapor no confinadas		357
11.4 Explosión de tanques sobrepresurizados		363
11.5 Zonas de alerta y de intervención [NTP 291 y NTP 321]		367
11.6 Cálculos experimentales		371
<b>12. Técnicas de intervención en las emergencias de Materias Peligrosas</b>		
12.1 Principales riesgos de las Materias Peligrosas		377
12.2 Mitigación de accidentes que involucran Materias Peligrosas		379
12.3 Técnicas de mando		383
12.4 Protocolos de intervención con Materias Peligrosas		393
<b>A I. Goma Xantana</b>		401
<b>A II. Expansión adiabática de gases perfectos</b>		405
<b>A III. Razón de temperaturas en expansión adiabática de gases perfectos</b>		409

**A IV. Líquidos inflamables**

Líquidos inflamables	413
Glosario. Características físico-químicas	415
Riesgos de líquidos inflamables	419
Zona de intervención	423
Niveles de protección personal	425
Normas de actuación en siniestros	427

**A V. Gases: su problemática específica**

Gases: su problemática específica	437
Clasificación	439
Transporte	445

**A VI. Factor de congelación y factor de percolación en la evaporación de líquidos inflamables derramados** 465**A VII. Líquidos inflamables. Variación de la peligrosidad con la temperatura y la presión**

Líquidos inflamables. Variación de la peligrosidad con la temperatura y la presión	471
Equipos de protección personal	477

**A IX. Espumas** 485**APPO**





Introducción	501
El lenguaje Delphi	503
APPO	509
APPO – Módulo de apoyo	511
APPO – Base de datos	527
APPO – Módulo de cálculos	531
<b>CONCLUSIONES Y RESULTADOS</b>	<b>559</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>565</b>



**Antecedentes.**



## Antecedentes

Tanto los productos manufacturados como las materias primas (el carbón, el petróleo y sus derivados, etc.) se obtienen en unas zonas geográficas concretas y se consumen en otras, muchas veces muy distantes entre sí. Esto trae como consecuencia que sea necesario transportarlas desde las zonas de producción a las zonas de consumo, con el consiguiente incremento de los riesgos de accidentes y contaminación.

Las últimas estadísticas presentadas por la Dirección General de Protección Civil revelan que el 53 % de los accidentes de mercancías peligrosas por vía terrestre registrados en toda la geografía española corresponden a líquidos inflamables y gases (básicamente gasolinas, gasóleos y alcoholes). De este porcentaje, el 80 % corresponde a vehículos cisterna.

Ante la incapacidad de disminuir el consumo de dichos productos en nuestra sociedad, su transporte por vía marítima y vía terrestre se ha visto incrementado y el número de accidentes también.

Los accidentes por vía marítima tienen graves consecuencias medioambientales, personales y económicas. Destacan los siguientes:

- Hundimiento del buque petrolero *Erika* que transportaba fueloil pesado frente a las costas de Bretaña el día 12 de diciembre de 1999
- Hundimiento del buque petrolero *Prestige* el día 13 de noviembre de 2002 frente a las costas de Galicia. El derrame de fueloil pesado que produjo, ha sido considerado el tercer accidente más costoso de la historia
- Vertido de crudo de petróleo en el mar a 50 km de Hurghada (Mar Rojo) el 20 de junio de 2010 debido a una avería en una refinería de petróleo.
- Vertido de crudo de petróleo en el mar en la ciudad de Dalian (China) el 16 de julio de 2010 tras una serie de explosiones que afectaron a dos oleoductos propiedad de la compañía estatal China National Petroleum Corporation (CNPC).
- Derrame de crudo de petróleo en el mar el día 2 de septiembre de 2010 en la plataforma petrolífera Vermilion Block 380 situada en el Golfo de México.
- Vertido de crudo de petróleo en la ciudad de San Martín Texmelucán del estado de Puebla (México) el día 19 de Diciembre de 2010 tras explotar un oleoducto propiedad de Petróleos Mexicanos (Pemex). Se registraron 27 muertos y 52 heridos.
- Derrame de 180000 litros de crudo de petróleo el día 22 de diciembre de 2010 en la plataforma Casablanca, situada en el Delta del Ebro, a 54 kilómetros de Sant Carles de la Ràpita.

Los accidentes por vía terrestre en los que están involucradas las mercancías peligrosas son muy preocupantes y pueden tener finales muy trágicos.

- Accidente de un camión cisterna cargado de fueloil, que afectó a la albufera de Alcudia, zona declarada Parque Natural.
- El estallido de una acumulación de gas propano en el sótano de una cafetería ubicada en el Paseo Marítimo de Palma provocó el domingo 27 de septiembre de 1998 un muerto y más de 40 heridos.
- Colapso de la ciudad Palma el día 6 de octubre de 2006 por el accidente y vuelco de un camión cisterna que derramó 32000 litros de gasoil en el polígono de Son Castelló. No se registraron daños personales graves.

- Vertido de 6000 litros de gasoil de calefacción el día 26 de enero de 2008 en el torrente de Sa Riera (zona protegida "Red Natura" de la Unión Europea) por la rotura del depósito de almacenamiento de un hotel en Puigpuyent.
- Vuelco de un camión cisterna que transportaba gasolina el día 13 de enero de 2011 en la carretera Valldemossa-Deià. La estructura estanca del vehículo contuvo el derrame. No se registraron daños personales graves.
- Accidente de un camión cisterna que transportaba gasolina y gasoil el día 7 de agosto de 2013 en la carretera que conecta el Port d'Alcudia con el Port de Pollença. La estructura estanca del vehículo contuvo el derrame.
- Vuelco de un camión cisterna que transportaba gasoil el día 13 de noviembre de 2013 en la carretera Pina-Sineu. La estructura estanca del vehículo contuvo el derrame. No se registraron daños personales graves.
- Vuelco de un camión cisterna y derrame de 3000 litros de gasoil el día 5 de febrero de 2014 en la carretera Inca-Sineu. No se registraron daños personales graves.

Todos estos acontecimientos han propiciado que las nuevas tecnologías desarrollen programas informáticos diversos capaces de simular los diferentes sucesos que ocurren o pueden ocurrir en los accidentes de mercancías peligrosas. La información que facilitan es muy útil para los mandos que tienen a su cargo los equipos de emergencia.

Los programas más significativos son los siguientes:

- CHEMS-PLUS (Chemical Hazard Evaluation Methodologies)
- ELSA (Emergency Level Scale Assessment)
- EPI (Emergenci Prediction Information)
- ARCHIE (Automated Resource for Chemical Hazard Incident Evaluation)
- FIREX (Análisis de consecuencias de accidentes graves de incendios y explosiones)

Todos ellos cuentan con completas bases de datos que les permite simular accidentes muy diversos con una gran cantidad de mercancías peligrosas. Esto ha provocado que

ninguno de ellos se haya especializado en el caso concreto de los gases inflamables y líquidos derivados del petróleo.

Dado que el 53 % de los accidentes, o más en la comunidad de les Illes Balears, está relacionado con líquidos inflamables y gases (básicamente gasolinas, gasóleos y alcoholes), sería de gran utilidad para los mandos de los equipos de intervención, el poder conocer cuáles serán los resultados finales del accidente al que se enfrentan, y sobre todo, cómo evoluciona el sistema con el paso del tiempo: desde que comienza el accidente hasta que acaban todos sus efectos.



**Objetivos.**



El objetivo de esta tesis es el de desarrollar el programa informático APPO (Accidentes de Productos derivados del PetrOleo) para poder simular los accidentes en los que se encuentran implicados los gases inflamables y los líquidos derivados del petróleo. Es una "herramienta" que servirá de apoyo en la toma de decisiones a los mandos o a las personas responsables de los equipos de intervención durante una de las siguientes emergencias:

- 1.** Derrame de líquidos almacenados en depósitos no presurizados.
- 2.** Derrame de líquidos almacenados en depósitos presurizados.
- 3.** Derrame de líquidos almacenados en depósitos o recipientes presurizados.
- 4.** Estimación del área que ocupa un derrame.
- 5.** Evaporación de un derrame.
- 6.** Combustión de un derrame.
- 7.** Chorros de fuego (*jet-flame*).
- 8.** BLEVE.
- 9.** Explosiones.

Para conseguir este objetivo, el programa informático deberá de cumplir las siguientes premisas básicas:

- Ser rápido
- Fácil de usar (en emergencias complicadas, los miembros del equipo de intervención se pueden poner nerviosos y cometer errores, el programa informático no debe de ser difícil de utilizar).
- No necesitará la introducción de muchos datos iniciales para realizar los cálculos.
- No precisará de equipos informáticos sofisticados (un simple ordenador portátil ubicado en un camión o furgoneta debe de ser suficiente).
- Aportará toda la información necesaria sobre la mercancía peligrosa involucrada en el accidente (así el mando no deberá de invertir su tiempo en la búsqueda de información: manuales, libros, consultas telefónicas, etc.).
- Simulará el accidente y evaluará/cuantificará las consecuencias.

**Materias peligrosas.**

CAPITULO

1





## 1.1 Materias peligrosas, definición

El Reglamento (CE) nº 1272/2008 de 16 de diciembre de 2008 define las materias peligrosas como todo material nocivo o perjudicial que, durante su **fabricación, almacenamiento, transporte o uso**, pueda generar o desprender **humos, gases, vapores, polvos o fibras** de naturaleza peligrosa ya sea **explosiva, inflamable, tóxica, infecciosa, radiactiva, corrosiva o irritante** en cantidades que tengan probabilidad de causar lesiones y daños a **personas, instalaciones o medio ambiente**.

El número de sustancias peligrosas es muy elevado: algunos manuales registran más de doce mil. La última edición del "libro naranja" (UN Recommendations on the Transport of Dangerous Goods. Model Regulation - fifteen ed. 2008) sobre transporte de mercancías peligrosas tiene recogidas las aproximadamente tres mil cuatrocientas más importantes, desde el punto de vista de su peligrosidad y de la importancia socio-económica de su producción y transporte. De momento existen catalogados más de siete millones de moléculas químicas distintas que si bien muchas de ellas no tienen relevancia industrial, da una idea de la importancia de su número y enorme variedad.

Hoy en día no se podría prescindir de estas materias. No es posible imaginar la época en que vivimos sin que exista la gasolina que nos proporciona la energía para los medios de transporte y maquinaria diversa, sin los abonos necesarios para aumentar la cantidad y



calidad de las cosechas, sin todos los derivados de los plásticos, sin los desinfectantes como el cloro, que garantizan la salubridad del agua, sin los medicamentos que preservan nuestra salud,...

Algunos de los productos considerados como peligrosos son materias primas que hay que transportarlas desde sus puntos de extracción, por lo general zonas no industrializadas, hacia los países desarrollados. Otras materias peligrosas son productos intermedios, que se utilizan en los procesos industriales. Finalmente, hay otros que son productos terminados y elaborados, que hay que transportar desde su lugar de producción y fabricación hasta los puntos de consumo.

Cuando estos productos son objeto de transporte, se denominan **mercancías**, ya sean materias, sustancias u objetos.





## 1.2 Clasificación de las materias peligrosas

El Comité de Expertos de Seguridad de la ONU, en sus "*Recomendaciones relativas al Transporte de Mercancías Peligrosas*" (Libro naranja) establece la siguiente secuencia para la clasificación de todas las mercancías peligrosas (el orden de enumeración no guarda relación alguna con la magnitud del peligro)

### **Clase 1. Sustancias y objetos explosivos**

Dentro de esta clase figuran algunos de los productos más peligrosos. Incluyen no solo explosivos en sí, sino también sustancias, tales como algunas sales metálicas, que por sí mismas o en ciertas mezclas, o cuando están expuestas al calor, choque o fricción, pueden causar explosiones, generalmente seguidas de incendio. Algunas sustancias pueden convertirse en explosivas debido a cambios químicos en su estructura (auto-oxidación) sin causa alguna aparente. Su transporte, debido a sus características especiales tiene una regulación especial. Pertenecen a esta clase:

- a) Las sustancias explosivas, excepto las que son demasiado peligrosas para ser transportadas y aquellas cuyo principal riesgo corresponde a otra clase.

- b) Los objetos explosivos, y las sustancias y objetos no mencionados en los apartados a) y b), que se fabriquen para producir un efecto práctico, explosivo o pirotécnico.

Las materias y objetos explosivos de la clase 1, deben incluirse en una división y en uno de los grupos de compatibilidad que a continuación se detallará, y su código de clasificación está formado por el número de la división y la letra del grupo de incompatibilidad.

Las divisiones son las siguientes:

- 1.1** Materias y objetos que presentan un riesgo de explosión en masa. Afecta de manera casi instantánea a toda la carga.
- 1.2** Materias y objetos que presentan un riesgo de proyección sin riesgo de explosión en masa.
- 1.3** Materias y objetos que presentan un riesgo de incendio con ligero riesgo de efectos de llama o producción de onda expansiva o de proyección, o bien de ambas, pero sin riesgo de explosión en masa.
- 1.4** Materias y objetos que solo presentan un pequeño riesgo de explosión en caso de ignición o cebado durante el transporte. Los efectos se limitan esencialmente a los bultos y normalmente no dan lugar a la proyección de fragmentos de tamaño apreciable ni a grandes distancias. Un incendio exterior no debe implicar la explosión prácticamente instantánea de la casi totalidad del contenido de los bultos.
- 1.5** Materias muy poco sensibles que implican un riesgo de explosión en masa, con una sensibilidad tal que, en condiciones normales de transporte, hay muy poca probabilidad de detonación o de paso de la combustión a la detonación.
- 1.6** Objetos extremadamente poco sensibles que no supongan riesgo de explosión en masa. Dichos objetos no contendrán más que materias detonantes extremadamente poco sensibles y que presenten una probabilidad despreciable de propagación accidental. El riesgo queda limitado a la explosión de un objeto único.



Los grupos de compatibilidad son los siguientes:

- A.** Materia explosiva primaria.
- B.** Objeto que contenga una materia explosiva primaria y que tenga menos de dos dispositivos de seguridad eficaces.
- C.** Materia explosiva propulsora u otra materia explosiva secundaria deflagrante u objeto que contenga dicha materia explosiva.
- D.** Materia explosiva secundaria detonante o pólvora negra, u objeto que contenga una materia explosiva secundaria detonante, en cualquier caso sin medios de detonación ni carga propulsora, u objeto que contenga una materia explosiva primaria y que tenga al menos dos dispositivos de seguridad eficaces.
- E.** Objeto que contenga una materia explosiva secundaria detonante, sin medios de cebado, con carga propulsora.
- F.** Objeto que contenga una materia explosiva secundaria detonante, con sus propios medios de cebado, con carga propulsora.
- G.** Materia pirotécnica u objeto que contenga una composición pirotécnica, o bien objeto que contenga a la vez una materia explosiva y una composición luminosa, incendiaria, lacrimógena o fumígena.
- H.** Objeto que contenga una materia explosiva y además fósforo blanco.
- I.** Objeto que contenga una materia explosiva y además un líquido o gel inflamables.
- J.** Objeto que contenga una materia explosiva y además un agente químico tóxico.
- K.** Materia explosiva u objeto que contenga una carga explosiva y presente además un riesgo particular y que exija el aislamiento de cada tipo.
- L.** Objetos que no contengan más que materias detonantes extremadamente poco sensibles.
- M.** Materia u objeto embalado o concebido de forma que todo efecto peligroso debido a un funcionamiento accidental quede circunscrito al embalaje, a menos que éste haya quedado deteriorado por el fuego, en cuyo caso los efectos de la onda expansiva deben ser lo suficientemente reducidos para no entorpecer la lucha contra incendios ni otras medidas de emergencia en las inmediaciones del bulto.

## **Clase 2. Gases comprimidos, licuados, disueltos a presión y refrigerados**

Se consideran materias de la clase 2, las materias que a 50 °C, tengan una tensión de vapor superior a 300 kPa (3 bar); o esté en estado gaseoso a 20 °C, a la presión normalizada de 101,3 kPa. Dentro de esta denominación entran muy variados tipos de productos que pueden presentar riesgos muy distintos. Los hay inflamables y no inflamables, tóxicos y no tóxicos. Además los hay inflamables y tóxicos (a la vez). Otra familia importante por lo peligrosa es la de los productos químicamente inestables que pueden ser además tóxicos y no tóxicos.

Las materias y objetos de la clase 2 se subdividen del modo siguiente:

- 1.** Gases comprimidos: gases cuya temperatura crítica sea inferior a 20 °C. Aire comprimido, nitrógeno comprimido, oxígeno comprimido, etc.
- 2.** Gases licuados: gases cuya temperatura crítica sea igual o superior a 20 °C. Cloro, amoníaco, propano, butano, etc.
- 3.** Gases licuados refrigerados: gases que, cuando son transportados, se encuentran parcialmente en estado líquido a causa de su baja temperatura. Neón líquido refrigerado.
- 4.** Gases disueltos a presión: gases que, cuando son transportados, se encuentran disueltos en un disolvente. Amoníaco en agua, acetileno en acetona, etc.
- 5.** Aerosoles y recipientes de reducida capacidad que contengan gases (cartuchos de gas a presión).
- 6.** Otros objetos que contengan un gas a presión.
- 7.** Gases no comprimidos no sometidos a disposiciones especiales.
- 8.** Recipientes vacíos y cisternas vacías.

Todos los gases quedan asignados a uno de los grupos siguientes en función de las propiedades peligrosas que presenten:



- A** asfixiante: gas no comburente, no inflamable y no tóxico que diluya o reemplace el oxígeno normalmente presente en la atmósfera.
- O** comburente: pueden causar o favorecer más que el aire, en general mediante la aportación de oxígeno, la combustión de otras materias.
- F** inflamable: gas que a una temperatura de 20 °C y presión de 101,3 kPa, sea inflamable en mezclas de un 13% como máximo (volumen) con aire, o que tenga una banda de inflamabilidad con el aire de al menos 12 puntos de porcentaje, con independencia de su límite inferior de inflamabilidad
- T** tóxico: gas cuya CL50 para la toxicidad aguda es inferior o igual a 5.000 ml/m<sup>3</sup> (ppm).
- TF** tóxico, inflamable
- TC** tóxico, corrosivo
- TO** tóxico, comburente
- TFC** tóxico, inflamable, corrosivo
- TOC** tóxico, comburente, corrosivo

### **Clase 3. Líquidos inflamables**

Son los líquidos, mezclas de líquidos o líquidos que contienen sustancias sólidas en solución o suspensión (pinturas, barnices, lacas, etc., siempre que no se trate de sustancias incluidas en otras clases por sus características peligrosas) que desprenden vapores inflamables a una temperatura no superior a 60,5 °C.

Son generalmente líquidos que por efecto de una llama o por aumento de temperatura pueden arder. Gasolinas, gasóleos, aceites minerales, benceno, barnices, alcoholes, etc. Esta definición se aplica a las materias y los objetos que contengan materias que:

- i.** Tengan un punto de fusión igual o inferior a 20 °C a una presión de 101,3 kPa.
- ii.** Tengan, a 50 °C, una presión de vapor máxima de 300 kPa (3 bar) y no sean completamente gaseosos a 20 °C y a la presión normalizada de 101,3 kPa.

- iii. Tengan un punto de inflamación máximo de 61 °C.
- iv. Materias sólidas en estado fundido cuyo punto de inflamación sea superior a 61 °C y que sean entregadas al transporte o transportadas en caliente a una temperatura igual o superior a su punto de inflamación.

Según su grado de peligrosidad, se clasifican como sigue:

- **Letra a) materias muy peligrosas:** materias líquidas inflamables con un punto de ebullición de 35 °C como máximo, y materias líquidas inflamables con un punto de inflamación inferior a 23 °C, que o bien son muy tóxicas o muy corrosivas según los criterios de los reglamentos.
- **Letra b) materias peligrosas:** materias líquidas inflamables que tengan un punto de inflamación inferior a los 23 °C y que no estén clasificadas en la letra a) con excepción de las materias del marginal 2301, 5º c) del ADR.
- **Letra c) materias que presentan un grado menor de peligrosidad:** materias líquidas inflamables que tengan un punto de inflamación de 23 °C a 61 °C, comprendidos los valores límites, así como las materias de los marginales 2301, 5º c) del ADR.

#### **Clase 4. Sólidos inflamables. Sustancias que presentan riesgo de combustión espontánea. Sustancias que en contacto con el agua desprenden gases inflamables**

- 4.1** Sólidos inflamables. Sustancias sólidas que no están clasificadas como explosivas, pero que se inflaman con facilidad o pueden provocar o activar incendios por fricción.
- 4.2** Sustancias que presentan riesgo de combustión espontánea. Sustancias que pueden calentarse espontáneamente en las condiciones normales de transporte.



- 4.3** Sustancias que en contacto con el agua desprenden gases inflamables. Sustancias que por reacción con el agua pueden hacerse espontáneamente inflamables o desprender gases inflamables en cantidades peligrosas.

### **Clase 5. Sustancias comburentes. Peróxidos orgánicos**

- 5.1** Sustancias comburentes. Sustancias que, sin ser necesariamente combustibles, pueden, generalmente liberando oxígeno, causar o facilitar la combustión de otras.
- 5.2** Peróxidos orgánicos. Sustancias térmicamente inestables que pueden tener una o varias de las propiedades siguientes:
- Ser susceptibles de una descomposición explosiva.
  - Arder rápidamente.
  - Ser sensibles a los choques o fricción.
  - Reaccionar peligrosamente al entrar en contacto con otras sustancias.
  - Causar daños a la vista.

### **Clase 6. Sustancias venenosas (tóxicas) y sustancias infecciosas**

- 6.1** Sustancias venenosas (tóxicas). Pueden causar la muerte o lesiones graves o que pueden ser nocivas para la salud humana si se ingieren, se inhalan, o entran en contacto con la piel.
- 6.2** Sustancias que contienen microorganismos que pueden producir enfermedades en los animales y en humanos.



### **Clase 7. Materiales radiactivos**

Se entiende por material radiactivo todo aquel cuya actividad específica sea superior a 70 kBq/kg (0,002  $\mu$ Ci/g).

### **Clase 8. Sustancias corrosivas**

Son sustancias que, por su acción química, causan lesiones graves a los tejidos vivos con los que entran en contacto.

### **Clase 9. Sustancias peligrosas para el medio ambiente**

- M6** Materias contaminantes para el medio ambiente acuático, líquidas.
- M7** Materias contaminantes para el medio ambiente acuático, sólidas.
- M8** Microorganismos y organismos modificados genéticamente.





### 1.3 Identificación de las materias peligrosas

Son muchos los ejemplos que versan sobre la importancia que tiene el verificar la información recibida en la mayor brevedad de tiempo posible, y de como ésta, por las circunstancias del comunicante, la situación de emergencia y por las propias dificultades de recabar una información completa, no siempre se ajusta a la realidad. Asimismo, la falta de información sobre la existencia de materias peligrosas hace que en muchas ocasiones se corran riesgos considerados como innecesarios.

Por lo tanto, ante un incidente en el que estén involucradas materias peligrosas, y frente al impulso inicial de actuar con la máxima celeridad, se debe imponer un primer reconocimiento para entre otras acciones, **identificar** la materia implicada.

Hay seis métodos básicos que permiten la identificación de materias peligrosas, en los que la verificación de la información recibida, puede realizarse en la mayoría de los casos a distancia, con la utilización de prismáticos si fuese necesario, evitando de esta forma someter al personal que interviene a riesgos innecesarios hasta que se hayan identificado con seguridad los peligros existentes.

- Lugar y actividad
- Tipo y forma de recipientes
- Señales y colores

- Placas y etiquetas
- Fichas y documentos

La Tabla 1.1 muestra la clasificación, características y riesgos de las mercancías peligrosas.

Materia Peligrosa	Clasificación	Características	Riesgos
CLASE 1	<b>1a: Materias y objetos explosivos</b> Pólvora, trilita, dinamita, ... <b>1b: Objetos cargados con M.E.X</b> Mechas, pistones, espoletas, ... <b>1c: Inflamadores y similares</b> Bengalas, mechas, cerillas, ...	Sensibles al: <b>Calor</b> <b>Choque</b> <b>Fricción</b>	-Explosión de toda la masa -Proyección -Incendio
CLASE 2	<b>Comprimidos:</b> metano, oxígeno, ... <b>Licuidos:</b> cloro, butano, NH <sub>3</sub> , ... <b>Disueltos:</b> NH <sub>3</sub> en agua, acetileno, ... <b>Criogénicos:</b> N <sub>2</sub> , Ar, aire, ...	-Inflamables -No inflamables -Reactivos -Tóxicos	-Recipientes a presión -Incendio si son inflamables -Posibilidad de BLEVE
CLASES 3-4	<b>3 Líquidos inflamables:</b> gasolina, ... <b>4.1 Sólidos inflamables:</b> naftalina, ... <b>4.2 Inflamación espontánea:</b> fósforo <b>4.3 Con H<sub>2</sub>O dan gases infl.:</b> Na, K	Su grado de peligrosidad es proporcional a su <b>Flash Point</b> .	-Inflamables -A veces explosión -A veces corrosión o tóxicos
CLASE 5	<b>5.1 Comburentes u oxidantes</b> Percloratos, nitratos, cloritos, ... <b>5.2 Peróxidos orgánicos</b> Peróxido de butilo, de benzoilo, ...	Sustancias ricas en O <sub>2</sub> Ayudan a la combustión aunque no arden.	-Incremento incendio -A veces explosión
CLASE 6	<b>6.1 Tóxicos</b> Cianuro, arsénico, ... <b>6.2 Infecciosos</b> Recortes de piel, huesos, ...	-Polvos -Gases -Líquidos -Vapores	-Ingestión -Inhalación -Absorción cutánea
CLASE 7	II, III Uranio, Torio, ...	-Isótopos radiactivos -Combustibles nucleares -Material fusionable	-Radiactividad -Contaminación ambiente -Tumores
CLASE 8	<b>Ácidos, bases, orgánicos, etc.</b> Ac. Sulfúrico, hidróxido sódico, hidracinas, etc.	Lesiones graves a los tejidos humanos. Afectan a los metales	-Contaminación ambiente -Corrosividad

Tabla 1.1. Materias peligrosas, clasificación, características y sus riesgos.



## **Lugar y actividad**

La presencia de materias peligrosas, no sólo está restringida a las emergencias producidas en la industria o en el transporte, sino que también se encuentra en supermercados, garajes, e incluso en nuestros hogares. Cabe destacar cuatro áreas básicas:

- Producción.
- Almacenamiento.
- Transporte.
- Uso.

Ante una emergencia con materias peligrosas, la localización de la misma en alguna de las cuatro áreas básicas, puede dar desde los primeros momentos alguna referencia sobre el tipo o tipos de productos que pueden estar implicados.

Por otra parte, sería interesante e importante para la determinación de estos lugares potencialmente peligrosos, realizar en cada comunidad y con carácter preventivo, un análisis de los riesgos existentes y de su localización, de tal forma que los equipos de emergencias los conozcan antes de la emergencia.

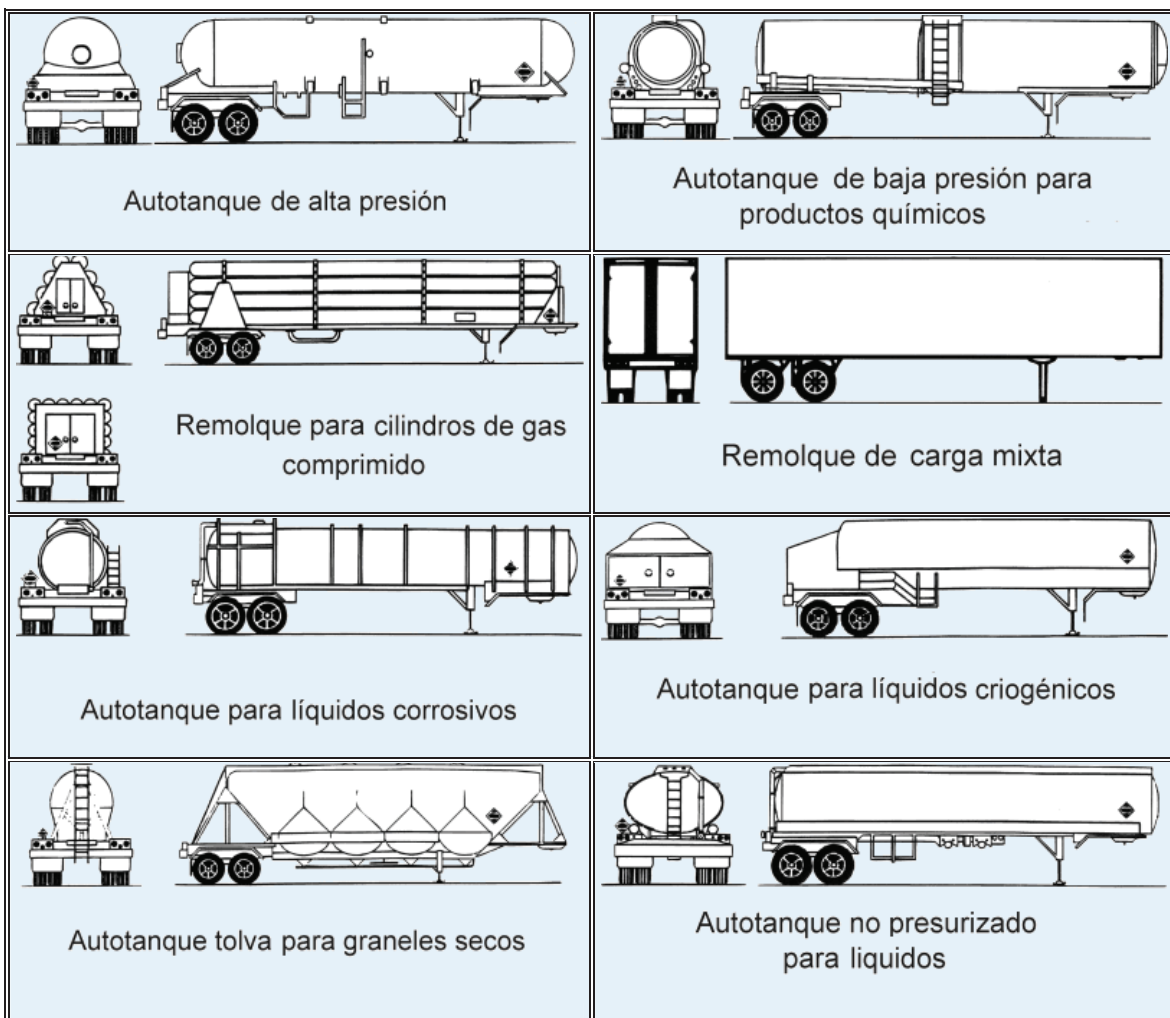
## **Tipo y forma de los recipientes**

Este método se basa en observar las características (tamaño, forma, etc.) del recipiente que contiene dicho producto.

La forma de algunos recipientes, sobre todo en el transporte, es tan característica que la presencia de algunas materias peligrosas puede ser fácilmente determinada.

Ejemplos (véase la Figura 1.1):

- Las cisternas presurizadas que transportan gases licuados, suelen tener forma redondeada.
- Las cisternas no presurizadas que transportan líquidos inflamables, suelen tener forma elíptica.
- Las cisternas para el transporte de productos tóxicos o corrosivos tienen la zona de valvulería tapada con una cubierta de protección.



**Figura 1.1.** Esquema de diferentes unidades de transporte paramercancías peligrosas.



## **Señales y colores**

El color se utiliza cada vez más en la señalización de seguridad, por ser un sistema rápido de identificación de riesgos.

Los recipientes que contienen materias peligrosas, tienen a menudo marcas específicas o colores que dan alguna indicación de su riesgo, o al menos, de su contenido.

Entre la amplia gama de colores, se han seleccionado y normalizado aquellos que por sí solos o acompañados de símbolos, fijan tanto el riesgo como los niveles de los mismos y en muchos casos sirven para orientar a los equipos de intervención sobre los procedimientos a seguir.

## **Tuberías industriales y sus colores de identificación**

En emergencias en las que están implicadas tuberías e instalaciones, lo primero que se debe hacer es identificar el tipo de fluido que conducen las tuberías. Por el color se sabrá el producto o productos afectados y se podrá actuar con precisión.

Los colores normalizados se aplican a lo largo de tuberías o bien en bandas de 20-25 cm. de ancho junto a válvulas, bombas y en tramos sucesivos en toda su longitud. Es norma también grabar en negro el nombre del producto y fijarlo en los lugares más visibles.

La normativa (UNE 1063) recomienda emplear pigmentos resistentes, para que los ácidos y otros fluidos que circulen por las tuberías no alteren o deterioren los colores de identificación.

En la Tabla 1.2 se indican los colores de señalización de tuberías de materias peligrosas que se utilizan en la industria según la norma UNE 1063.

<p><b>PRODUCTOS QUIMICOS</b></p>	<p>Ácido sulfúrico                      Ácido clorhídrico                      CO<sub>2</sub>, SH<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>                      Ácidos orgánicos                      Lejías alcalinas                      Amoniaco                      Sosa cáustica</p>	
<p><b>GAS</b></p>	<p>Gas de alumbrado                      Gas butano                      Gas propano                      Gas natural                      Acetileno                      Oxígeno                      Nitrógeno                      Hidrógeno</p>	
<p><b>AIRE</b></p>	<p>Aire (temp. ambiente)                      Aire comprimido                      Aire caliente</p>	
<p><b>AGUA Y VAPOR</b></p>	<p>Agua potable                      Agua caliente                      Vapor de agua</p>	

Tabla 1.2. Colores de señalización de tuberías dematerias peligrosas en la industria según la norma UNE 1063.

### Señalización de los gases industriales en botellas.

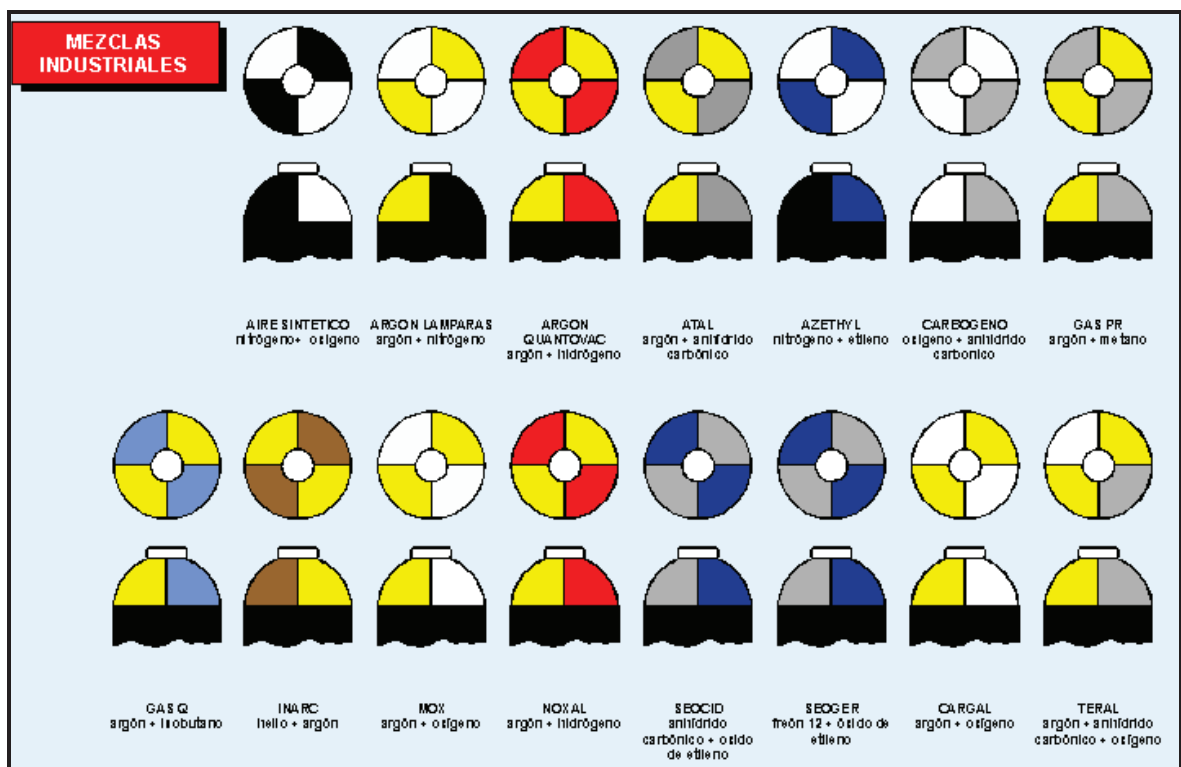
Es imprescindible que los equipos de intervención conozcan la señalización de los gases industriales contenidos en botellas. De esta forma y ante cualquier emergencia, podrán identificar a distancia y con rapidez, cualquier gas y actuar correctamente en cada caso.



En las Figuras 1.2 y 1.3 se indican los colores de las botellas de diferentes gases peligrosos.

**Cuerpo:** el color del cuerpo de la botella identifica el grupo a que corresponde el gas contenido.

**Ojiva y franja:** los colores de la ojiva, permiten conocer el gas contenido en función del color del cuerpo de la botella.



**Figura 1.2.** Color de las botellas de diferentes gases peligrosos.

En las mezclas de gases industriales, los cuerpos de las botellas van pintados con el color correspondiente al gas mayoritario, y las ojivas están pintadas en forma de cuarterones con los colores de los gases componentes.

Las mezclas de gases utilizados para fines específicos (mezclas de calibración, sector de análisis, etc.) llevan el cuerpo y la ojiva de color gris plateado.

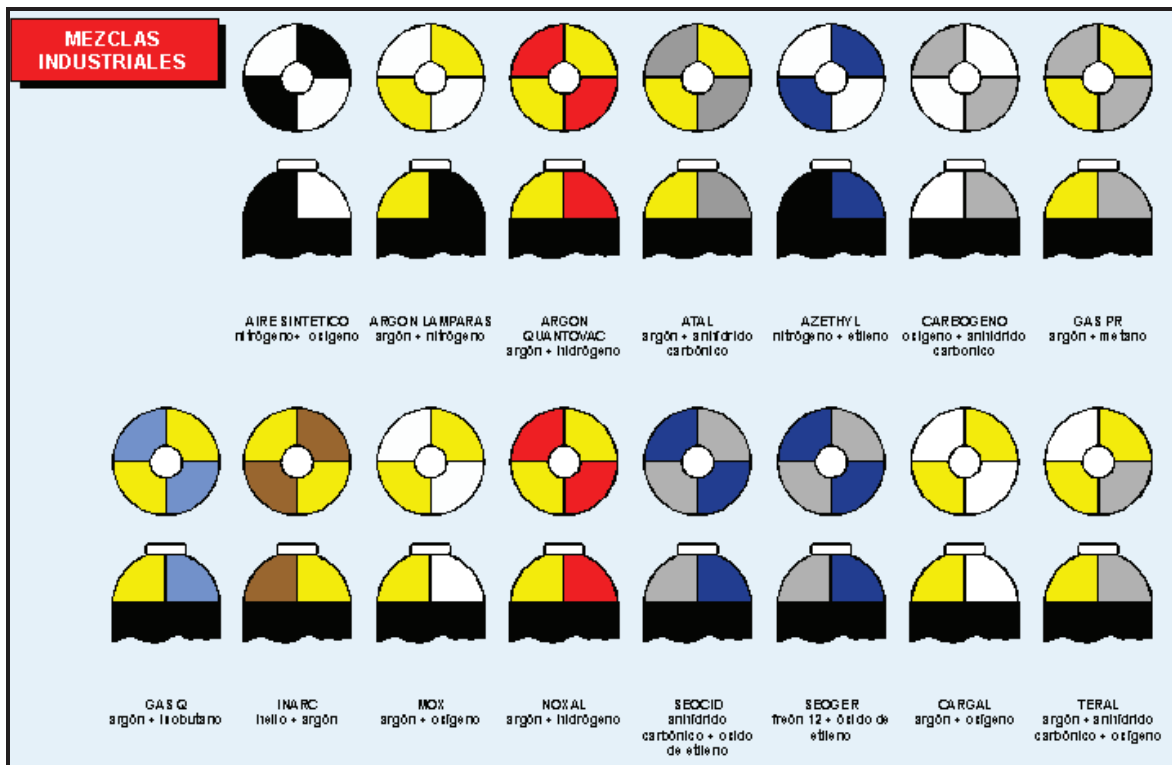


Figura 1.3. Color de las botellas que contienen mezcla de gases peligrosos.

### Placas y etiquetas

Otro método de identificación de las materias peligrosas, consiste en la colocación en las unidades de almacenamiento, transporte, y en los bultos que contengan este tipo de productos, paneles, etiquetas y rótulos especiales, indicativos de sus riesgos.

Estos sistemas de identificación, son de gran ayuda a la hora de identificar las materias peligrosas, aunque no pueden ser considerados como una definitiva fuente de identificación, ya que la experiencia demuestra que un gran número de vehículos circula señalizados incorrectamente, o incluso sin señalizar.





Los procedimientos para la identificación de la Materia Peligrosa mediante estos sistemas son:

**Número ONU - Nombre de la mercancía:** Con el fin de facilitar la identificación de cada una de las sustancias peligrosas, se ha adoptado un código numérico de cuatro cifras, dando un número a cada una de las Materias Peligrosas; el número ONU, el cual resuelve el problema de los distintos nombres técnicos que pueden adquirir los productos en cada idioma y evita las confusiones que pueden producirse debido al uso de distintas denominaciones comerciales para un mismo producto (en cada bulto o envase debe figurar el correspondiente Numero ONU).

**Etiquetas de peligro y rótulos:** Las etiquetas de peligro indicativas de los riesgos, están destinadas principalmente a ser colocadas sobre las mercancías, sobre los bultos o envases que las contienen. De esta manera, las mercancías peligrosas son fácilmente reconocibles a distancia por el aspecto general (símbolo, color y forma) de sus etiquetas, tal como se indica en la Figura 1.4.

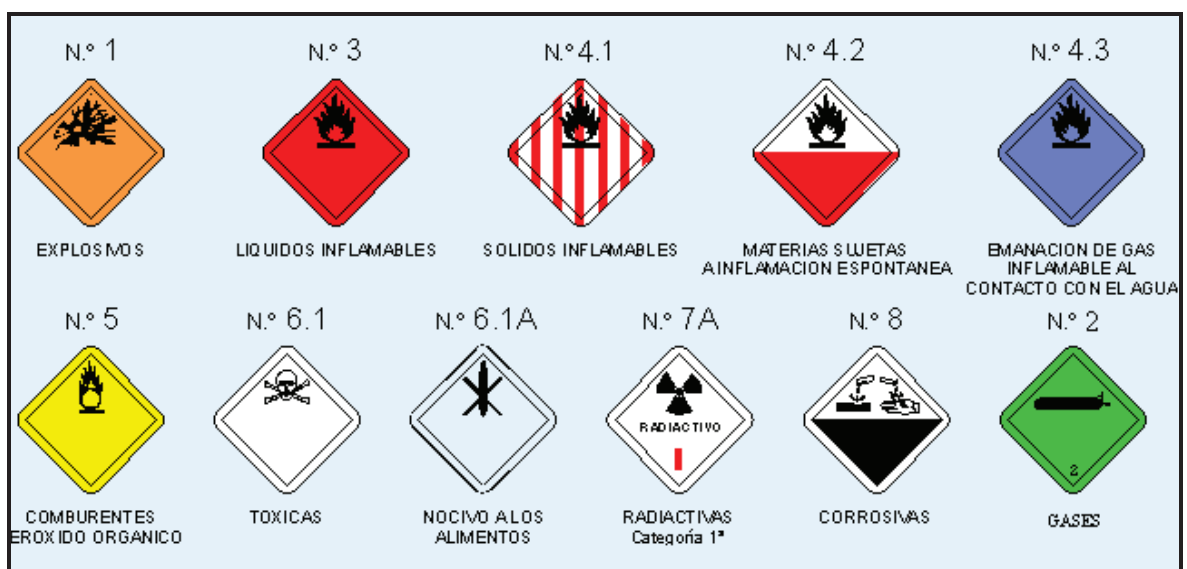
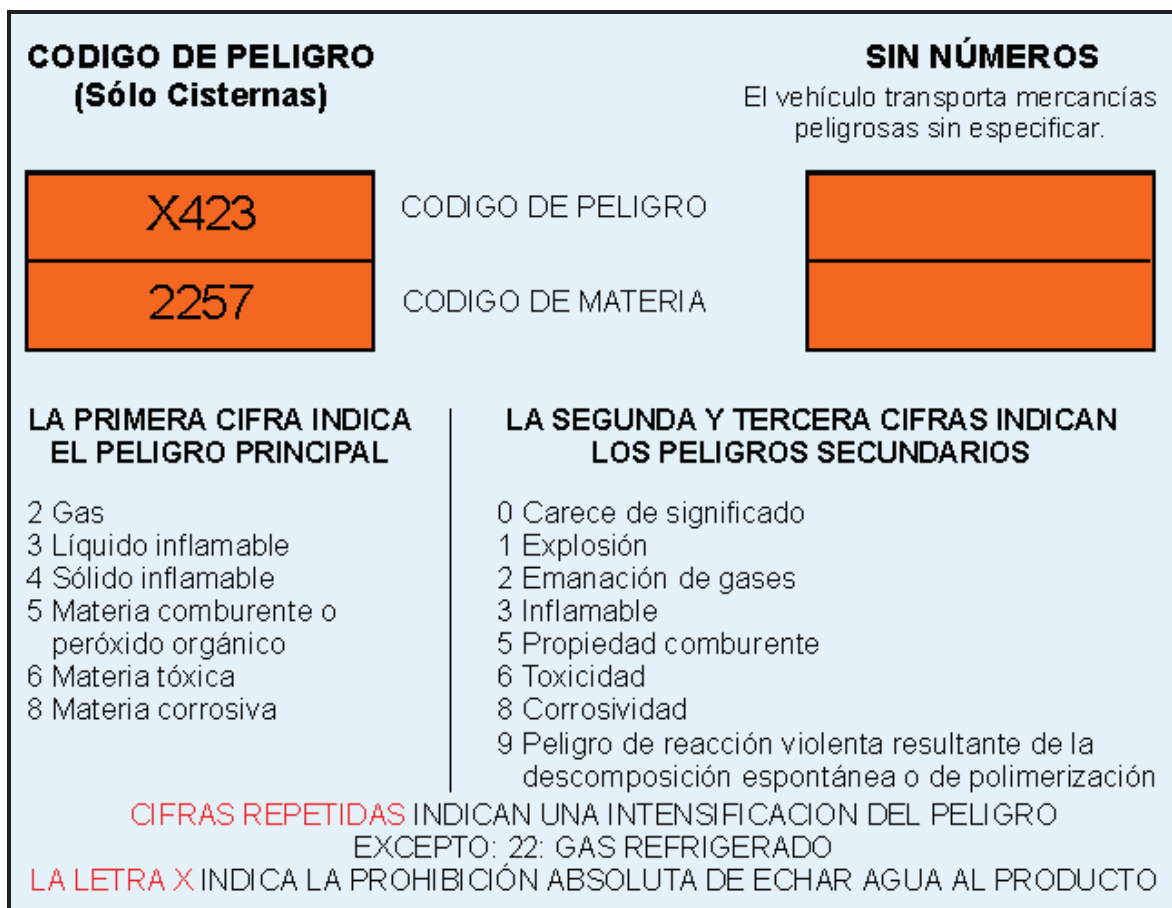


Figura 1.4. Etiquetas de peligro.

**Panel naranja:** El panel naranja es una placa rectangular de 40x30 ó 40x40, de color naranja dividida horizontalmente por una raya negra y con un reborde negro, que se utiliza para señalar algunas unidades de transporte de mercancías peligrosas. En la parte superior del panel naranja figura el código de peligro, un código numérico que indica el riesgo de las mercancías transportadas que se compone de dos o tres cifras y en ocasiones una letra) y en la parte inferior del panel aparece un número de cuatro cifras que indica el tipo de producto que se transporta (el número ONU). La Figura 1.5 corresponde a un esquema explicativo del panel naranja.



**Figura 1.5.** Esquema explicativo del panel naranja.



## Código Hazchem

El código Hazchem (utilizado en el transporte de Materias Peligrosas en el Reino Unido) no centra su atención en indicar las propiedades de un producto químico, sino en las acciones inmediatas de emergencia que hay que realizar para mitigar los efectos del incidente; así como garantizar la seguridad de las personas de los equipos de emergencia. Consta de varias secciones:

- **Código de acción de emergencia:** consiste en un número seguido por un máximo de dos letras. El número de una sola cifra, se refiere a los medios de extinción que deben ser utilizados (siempre se podrá utilizar un medio de extinción que tenga un número mayor que el indicado).
- **Número ONU:** número de 4 dígitos asignado por la ONU. El "libro naranja" de la ONU recoge aproximadamente 3.400 materias peligrosas.
- **Etiqueta del peligro principal:** para el caso de materias peligrosas que tienen asignado más de un peligro.
- **Logotipo de la empresa y Número de teléfono de emergencia.**

La Figura 1.6 corresponde a un esquema explicativo del código Hazchem.



Figura 1.6. Esquema explicativo del código HAZCHEM.

## Código NFPA - Diamante de peligro

El diagrama, denominado "diamante de peligro", es un sistema útil y sencillo recomendado por la NFPA (National Fire Protection Association-USA) para la identificación de productos químicos peligrosos, cuyo fin es el de alertar apropiadamente y salvaguardar las vidas, tanto de la comunidad como del personal que lucha durante una emergencia en una planta industrial, áreas de almacenaje o en emergencias durante el transporte.



Este sistema de identificación da una idea general de los peligros inherentes a cada producto químico, así como una indicación del orden de severidad de dichos peligros bajo condiciones de emergencia, como fuegos, fugas y derrames.

El diagrama identifica los peligros de un material en tres categorías, denominadas "Salud, Inflamabilidad y Reactividad", e indica el orden de severidad en cada una de las tres categorías, mediante cinco niveles numéricos, que oscilan desde el cuatro (4), indicando el peligro más severo o peligro extremo, hasta el cero (0), que indica la no existencia de un peligro especial.

En el diamante de peligro el término "salud", es identificado a la izquierda, en color azul; el peligro de "inflamabilidad" en la parte superior, en color rojo; y el peligro de "reactividad" a la derecha, en color amarillo. El espacio inferior es utilizado para identificar una reactividad no usual con el agua: así, si se encuentra vacía indica que puede normalmente utilizarse agua como agente extintor; una W con una línea atravesada en su centro alerta al personal que lucha contra el fuego del posible peligro al utilizar agua. Este espacio inferior también puede utilizarse para identificar peligros de emisión radiactiva mediante el símbolo correspondiente (trébol). También los productos químicos oxidantes son identificados en este espacio inferior por las letras OXW.

La Figura 1.7 corresponde a un esquema explicativo del código NFPA

### **Fichas y documentos - Carta de Porte**

La legislación (ADR) establece que toda operación de transporte de materias peligrosas exige al expedidor la confección de un documento denominado "Carta de Porte".



Figura 1.7. Código NFPA.

La **carta de porte** es un documento que siempre debe acompañar a la mercancía durante su transporte. Como mínimo deberá contener los siguientes datos:



- La designación de las mercancías, incluido el número ONU de identificación de la materia.
- La clase.
- El apartado de la enumeración, así como la letra, en su caso.
- Las iniciales ADR o RID.
- El número y la descripción de los bultos o de los GRG (grandes recipientes a granel).
- La cantidad total de mercancía peligrosa en volumen o en peso bruto o en peso neto.
- Nombre y dirección del expedidor.
- Nombre y dirección del(de los) destinatario(s).
- Declaración de conformidad con las disposiciones de cualquier acuerdo en particular.

**NOTA:** para el caso concreto de contenedores-cisterna vacíos sin limpiar, los seis primeros puntos no son obligatorios.

Modo de transporte	Nombre documento	Localización	Responsable
Carretera	Carta de porte	Cabina del vehículo	Conductor
Ferrocarril	Carta de porte	Máquina	Maquinista
Marítimo	Manifiesto de cargas peligrosas	Puente	Capitán
Aéreo	Listado de carga	Cabina	Piloto

Tabla 1.3. Identificación de los documentos de transporte.

## Fichas y documentos - Ficha de Seguridad

El Acuerdo Internacional para el Transporte de Mercancías Peligrosas por Carretera (ADR), obliga a que todos los vehículos que lleven mercancías de esa índole y en previsión de cualquier accidente, dispongan de unas instrucciones escritas llamadas "Fichas de Seguridad", que se dividen en dos grandes grupos:

**Por número de peligro:** engloba a todos los productos que poseen el mismo código de peligro. Tienen la ventaja de reducir el número de fichas, consiguiendo una mayor rapidez de acceso a la información (resultan muy manejables), pero al ser tan generales no son muy precisas.

**Por número de materia:** cada número de materia posee una ficha. Esto permite una mayor precisión y una actuación específica, el número de fichas es elevado y por lo tanto, su archivo es voluminoso, dificultando su transporte y utilización.

Dentro de cada grupo existen diferentes modelos, aunque básicamente siguen todos ellos el mismo esquema que el dictado por la Directiva 93/112/CE:

- Naturaleza de los peligros.
- Instrucciones generales.
- Medidas en caso de fuga e incendio.
- Primeros auxilios.

Para el transporte por ferrocarril en España, aunque el RID (International Regulations Concerning the Carriage of Dangerous Goods by Rail) no indica nada al respecto, una instrucción interna de RENFE establece que los Maquinistas deben tener las "Fichas de Seguridad" de las mercancías peligrosas transportadas.

En el transporte marítimo, no existe esta ficha, pero en todos los barcos que transportan materias peligrosas debe haber un ejemplar del código IMDG así como un libro llamado





"Fichas de emergencia" y otro libro denominado "Guía de la Organización Marítima Internacional de Primeros Auxilios", que llevan las instrucciones de actuación en caso de vertido, incendio y otras situaciones de emergencia, así como las pautas de tratamiento de los accidentados como consecuencia de los incidentes de mercancías peligrosas.

El reglamento de mercancías peligrosas por vía aérea (IATA – Asociación Internacional de Transporte Aéreo), establece la obligatoriedad de suministrar al piloto al mando, diversa información sobre las mercancías peligrosas cargadas, así como las instrucciones para la tripulación de vuelo acerca de las medidas que deben adoptarse en el caso de que surjan situaciones de emergencia.

Las fichas de seguridad deberían encontrarse también en todos los Parques y vehículos de los Servicios de Intervención, a fin de que las actuaciones en estos casos sean correctas y eficaces.

### **Aparatos de detección y medida**

Los equipos y aparatos de detección y medida (explosímetros, tubos colorimétricos...etc.), a menudo aportan datos concernientes a la naturaleza del riesgo con que se enfrentan los equipos de intervención, ayudando a detectar atmósferas inflamables o explosivas, deficiencias de oxígeno, ciertos gases y vapores (SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, etc.), radiación ionizante, ...

En la Tabla 1.4 se indican los aparatos de detección y medida de materias peligrosas, los riesgos que pueden detectar cada uno de ellos y sus aplicaciones.

Tipo aparato	Riesgo identificado	Aplicaciones	Comentarios
Explosímetro	Gases y vapores inflamables y combustibles	Comprobar las concentraciones de vapores de gas o vapores inflamables en el ambiente	Los filamentos pueden ser dañados por ciertos compuestos como la silicona, plomo tetraétilico y atmósferas enriquecidas en oxígeno
Medidor de oxígeno	Oxígeno	Contenido de oxígeno en el aire	Interferencias de algunas sustancias (cloro, fluor) Temperaturas extremas retrasan el movimiento del medidor
Tubos colorimétricos Detectores de gases	Gases y vapores específicos	Presencia de vapores de gas o inflamables y polvos en determinados ambientes	Interferencia de productos químicos similares a la muestra Caducidad Usado para medidas cualitativas
Medidor de pH	Corrosividad	Medida de corrosividad según pH	Determinan si un producto es ácido o básico Lecturas de menos de 2 ó más de 12 implican precaución extrema
Detectores y dosímetros de radiación	Radiaciones alfa, beta o gamma	Definen y miden las radiaciones ionizantes.	Los medidores "Geiger" no detectan ninguna radiación alfa

Tabla 1.4. Aparatos de detección y medida de materias peligrosas. Riesgos detectados y sus aplicaciones.

**Producción y transporte  
de materias peligrosas.  
Accidentes y estadísticas.**





## 2.1 Introducción

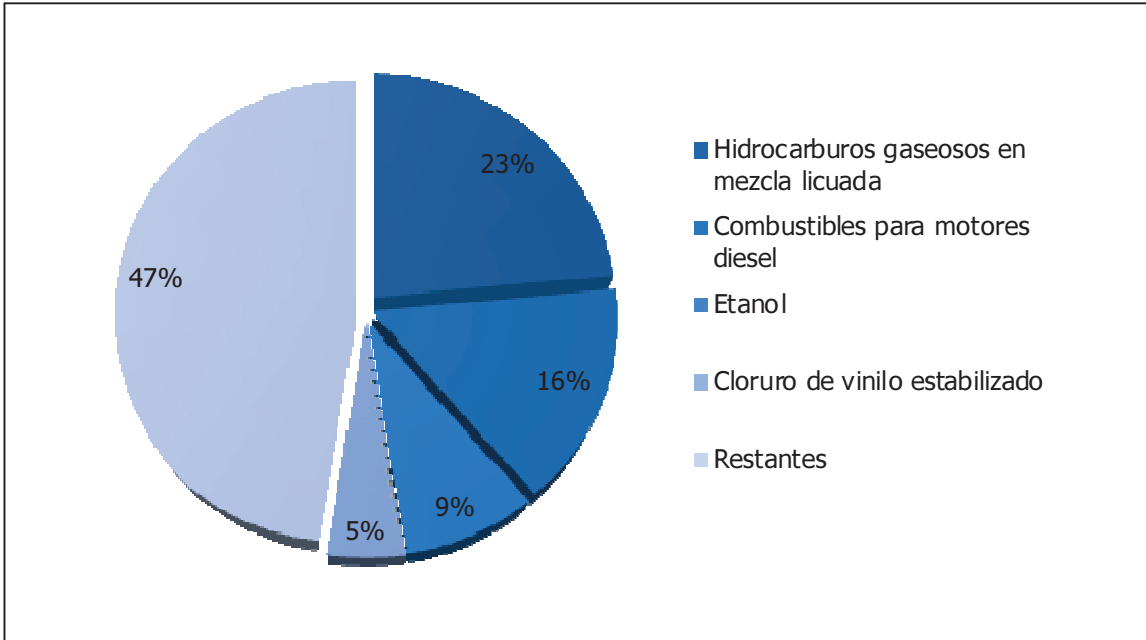
Según estudios publicados por la Dirección General de Protección Civil y emergencias, la producción media española de **materias peligrosas** se estima que supera los 200 millones de toneladas al año. De esta cantidad, descontando el consumo en los lugares de origen, el reparto en cargas inferiores a 1000 kg y las cantidades transportadas a granel por vía marítima, resulta que se transportan por vía terrestre unos 140 millones de toneladas.

De las más de 380 materias peligrosas catalogadas, destaca el hecho de que tan sólo tres, ya suman el 47,55 % del transporte por vía terrestre (véase el Gráfico 2.1 que muestra el tráfico de mercancías peligrosas en España). En el caso concreto de nuestra comunidad autónoma, esta proporción asciende hasta el 83,15 %.

1202 – combustible para motores diesel.

1965 – hidrocarburos gaseosos en mezcla licuada.

1170 – etanol o etanol en solución.



**Gráfico 2.1.** Tráfico de mercancías peligrosas.

Estas materias, que suelen ser transportadas individualmente o combinadas en contenedores cisterna, es habitual verlas circulando o descargando en polígonos y carreteras. La Fotografía 2.1 muestra alguno de los tanques de almacenamiento de líquidos inflamables que tiene en Son Banya la Compañía Logística de Hidrocarburos (CLH).



**Fotografía 2.1.** Almacenamiento de líquidos inflamables de la compañía CLH.

## 2.2 Localización de importantes centros de producción

Para poder analizar las rutas utilizadas para el transporte de materias peligrosas es necesario conocer los principales núcleos de producción de dichas materias. De entre todas podemos destacar:

**Refinerías de petróleo:** Huelva, Algeciras, Cartagena, Castellón, Tarragona, Somorrostro, La Coruña, Puertollano y Santa Cruz de Tenerife.

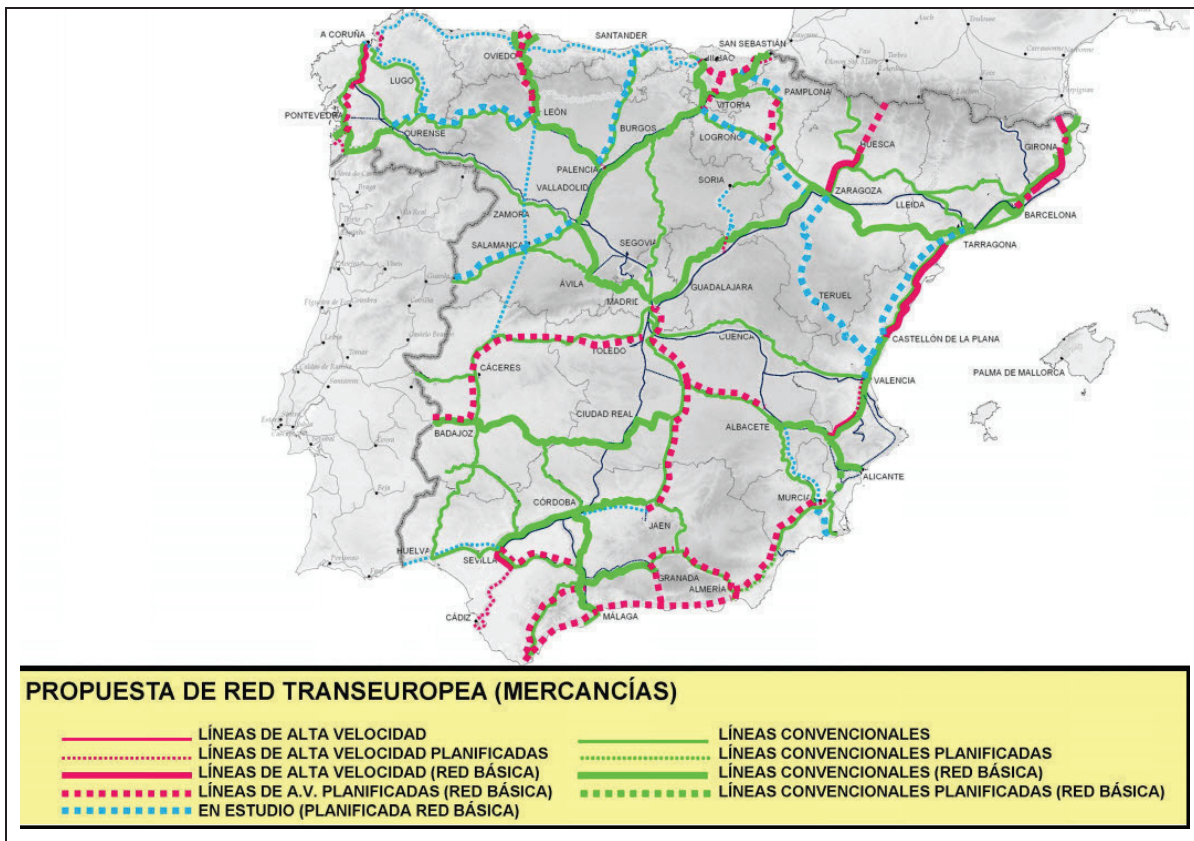
**Terminales de oleoductos:** Rota, Málaga, Puertollano, Almodovar, Loeches, Villaverde, Barajas, Zaragoza, Ayoluengo y Quintanilla.

**Puertos más utilizados:** Huelva, Bahía de Cádiz, Algeciras, Málaga, Cartagena, Valencia, Castellón, Tarragona, Barcelona, Bilbao, Santander, Gijón-Musel, Avilés, La Coruña, Santa Cruz de Tenerife y Puerto de la Luz (Las Palmas).

**Industrias petroquímicas:** Huelva, Algeciras, Cartagena, Castellón, Tarragona, Martorell, Bilbao, Torrelavega y Sabiñanigo.

**Centrales nucleares:** Ascó, Vandellós, Santa María de Garoña, Zorita de los Canes, Cofrentes y Almaraz.

El mapa 2.1 muestra los itinerarios más importantes por donde circulan mercancías peligrosas en España.



**Mapa 2.1.** Itinerarios de mercancías más importantes en España.

De los diferentes centros de producción, saldrán las materias peligrosas para su venta y distribución.

La trama de color verde (líneas convencionales) del Mapa 2.1 coincide con la red de carreteras por las que discurre la mayor parte del tráfico de materias peligrosas de medio y largo recorrido. Curiosamente se corresponde con los itinerarios que sigue el transporte de butano y propano.



### 2.3 Accidentes en el transporte por vía terrestre

Tomando como referencia los accidentes notificados a la Dirección General de Protección Civil (periodo del que se tiene documentación: 1.997 – 2.010), se observa con lógica, que existe una relación clara entre el principal tipo de transporte (el de productos energéticos) y el número de accidentes, pues desde el punto de vista estadístico está sujeto a una mayor ocurrencia. Las estadísticas revelan que en el 53,4 % de los accidentes se ha visto involucrada una mercancía de la Clase 3, y en el 18,9 % de la Clase 2.

Por tal motivo, el estudio de esta tesis y el desarrollo del programa informático, se centrará sobre todo en las mercancías peligrosas pertenecientes a las clases:

- Clase 3: líquidos inflamables.
- Clase 2: gases.

La Tabla 2.1 muestra las estadísticas de las emergencias de accidentes en el transporte de mercancías peligrosas (Dirección General de Protección Civil).

Comunidad Autónoma	1.997	1.998	1.999	2.000	2.001	2.002	2.003	2.004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Cataluña	19	31	22	29	22	12	20	35	41	28	30	28	39	57
Valencia	7	14	13	28	15	11	16	19	18	12	18	10	12	5
País Vasco	13	8	12	17	11	19	11	9	10	15	20	11	15	14
Castilla y León	9	9	14	16	17	8	7	7	9	15	5	11	10	7
Aragón	10	15	9	13	6	11	9	9	13	17	14	13	7	6
Galicia	17	4	11	12	11	11	10	7	5	3	7	8	22	14
Andalucía	6	10	7	16	11	19	23	18	23	16	11	20	11	10
Castilla la Mancha	2	14	8	15	7	10	13	12	3	8	6	7	8	8
Madrid	4	7	4	16	3	8	10	5	1	4	7	4	3	2
Murcia		6	7	9	5	4	5	8	2	4	4	6	1	2
Asturias	2	12	2	4	7	5	3	9	4	2	3	2	6	2
Cantabria		8	3	4		2	5		1	1	4		1	0
Extremadura	1	2		5	4	1	2	3	2		3	5	1	2
Canarias			1	1		2	1	5		1	1	3		4
Navarra			1	1		2	1	6	4	5	3	1	3	3
La Rioja					2	1	1	4			2	3	1	2
Illes Balears					1					2	1			2
Melilla														
Ceuta														
<b>TOTAL</b>	<b>90</b>	<b>140</b>	<b>114</b>	<b>186</b>	<b>122</b>	<b>126</b>	<b>137</b>	<b>156</b>	<b>136</b>	<b>133</b>	<b>139</b>	<b>132</b>	<b>140</b>	<b>143</b>

Tabla 2.1. Estadística de las emergencias de accidentes en el transporte de mercancías peligrosas. Dirección general de protección civil y emergencias.

## 2.4 Conclusiones significativas

Durante el periodo 1.997-2.010 se han producido en España 1.894 accidentes de los cuales el 95% tuvo lugar durante el transporte por carretera. Evidentemente existe una relación directa entre la densidad, la localización de las instalaciones y la concurrencia de los accidentes; Cataluña es la región donde más accidentes se han registrado, seguida de la Comunidad Valencia, Andalucía, País Vasco y Castilla y León (estas 5 comunidades contabilizan el 57 % del total de los accidentes).

De las víctimas originadas en estos accidentes, la Dirección General de Protección Civil y Emergencias declara que el 90% de los muertos y heridos son originados por el impacto físico del accidente (vuelcos, choques, etc.) y no atribuidos a la peligrosidad de la mercancía.

Que en el 53,4 % de los accidentes se ha visto involucrada una mercancía de la Clase 3 (líquidos inflamables). Básicamente combustibles para motor y alcoholes.



**Balance de energía mecánica.**

CAPITULO  
**3**



### 3.1 Introducción

Uno de los objetos de la Ingeniería Química es el de estudiar y comprender las leyes y los principios que rigen todas y cada una de las etapas físico-químicas que integran los procesos industriales. Con tales conocimientos, aborda el diseño de equipos e instalaciones capaces de desarrollar a nivel industrial las transformaciones y procesos experimentados en el laboratorio.

Dicha metódica, era en sus inicios, realizada considerando todos los procesos, cada uno de ellos por separado, hasta que en 1.915 en el Massachusetts Institute of Technology se inició la tendencia de estudiar las etapas físicas independientemente de los procesos de que forman parte. Así, nació el estudio de las denominadas operaciones básicas o "*unit operations*", que corresponden a cada una de las etapas físicas que se repiten en los distintos procesos industriales.

A medida que se profundizó en su estudio, se observó que en todos los procesos industriales, estas operaciones básicas se basan en tres fenómenos físicos que se rigen por leyes similares denominadas ***Fenómenos de Transporte:***

- transporte de cantidad de movimiento
- transporte de energía
- transporte de materia

Estos procesos se originan en el seno de los fluidos o entre sólidos y fluidos como consecuencia de los gradientes de concentración de dichas propiedades en el sistema, representando la tendencia de éste a alcanzar el equilibrio. Así, por ejemplo, en el caso de la circulación de fluidos, se produce un transporte de cantidad de movimiento de las regiones de mayor velocidad puntual a las de menor.



### 3.2 Balance de energía mecánica

Las operaciones unitarias basadas en el transporte de cantidad de movimiento se suelen ocupar del estudio del transporte de fluidos, bien cuando circulan por el interior de conducciones (flujo interno) o bien cuando se trata de un sólido que se desplaza por el seno del fluido (flujo externo).

Las operaciones unitarias basadas en el transporte de energía se encargan generalmente de estudiar la transmisión de energía calorífica en los diferentes procesos industriales.

Las operaciones unitarias basadas en la transferencia de materia engloban las etapas en las que se da una transferencia de materia entre fases, desde las corrientes de alimentación hasta las corrientes de productos.

En el transporte de fluidos, los problemas se resuelven mediante la aplicación de balances de materia y de energía. El balance de energía mecánica fruto de considerar las pérdidas friccionales ( $TdS = dq + d\Sigma F$ ) y la primera Ley de la Termodinámica aplicada a la unidad de masa de flujo circulante se caracteriza por el hecho de que sus términos pueden convertirse completamente mediante un proceso ideal reversible de una forma a otras (por ejemplo, que toda la energía cinética se puede transformar en energía potencial o trabajo), es el punto de partida para estimar los efectos mecánicos en el flujo de fluidos (pérdidas de presión, potencia de bombeo, velocidades, etc.). En el caso de los derrames,

al igual que en las conducciones, se opera con la ecuación diferencial [3.1] (Levenspiel O. 1993):

$$gdz + udu + \frac{dP}{\rho} + d(\Sigma F) + dW_s = 0 \quad [3.1]$$

donde  $gdz$ : corresponde al término de energía potencial (la debida a la posición de la masa en un campo, sea electrostático, magnético, gravitatorio, etc., aunque en la inmensa mayoría de los casos a tratar en el contexto de la Ingeniería Química, el término más importante, y que en muchos casos obvia a los demás, es el debido a la influencia del campo gravitatorio).

$udu$ : es el término de la energía cinética, que contempla todos los factores referentes al movimiento del fluido (velocidad) en el sistema.

$dP/\rho$ : corresponde al trabajo debido al flujo, que para fluidos incompresibles (densidad constante) se convierte en  $\Delta P/\rho$ .

$d(\Sigma F)$ : corresponde a la pérdida por fricción, o energía mecánica transformada irreversiblemente en energía interna y utilizada para calentar o vaporizar el fluido.

$dW_s$ : representa el trabajo recibido por el entorno (generalmente debido a bombas, compresores, soplantes y ventiladores, que son los elementos responsables, en muchas ocasiones, del movimiento de los fluidos en el sistema).

La ecuación [3.1] realmente no representa un balance, sino la pérdida de energía mecánica (la transformación irreversible en energía interna debido a la fricción) que experimenta un fluido a medida que circula por el sistema. En el caso concreto del derrame de líquidos contenidos en tanques, donde no intervienen motores, bombas, compresores, etc., el factor  $W_s$  (trabajo recibido por el entorno) es nulo, y la ecuación del balance, en su forma integrada, queda reducida a la expresión [3.2]:

$$g\Delta z + \Delta\left(\frac{u^2}{2\alpha}\right) + \int \frac{dP}{\rho} + \Sigma F = 0 \quad [3.2]$$

de la que se deduce la conocida ecuación de Bernoulli [3.3], que es aplicable a los casos en que el fluido no aporta trabajo al entorno, y los efectos friccionales son tan pequeños que pueden ignorarse completamente  $\Sigma F \cong 0$ :

$$g\Delta z + \Delta\left(\frac{u^2}{2\alpha}\right) + \int \frac{dP}{\rho} = 0 \quad [3.3]$$

Estudios reales realizados en las instalaciones de las destilerías ANTONIO NADAL, S.A. sobre el tiempo que tardan diferentes disoluciones en vaciarse de un depósito que tiene un orificio en su parte inferior, revelan que los efectos friccionales no deben ser simplificados. Así se prepararon seis disoluciones (ver el Anexo I) de 300 litros de goma xantana disuelta en agua (soluciones que se caracterizan por tener a una misma temperatura diferentes valores de viscosidad, manteniendo prácticamente constante la densidad), se introdujeron en un depósito de dimensiones conocidas, y se evaluó el tiempo de vaciado de cada una de ellas (Tabla 3.1).

características del depósito: Geometría: cilíndrico vertical.  
 Diámetro: 0,630 m.  
 Diámetro orificio: 0,025 m.  
 Volumen de fluido: 0,300 m<sup>3</sup>.  
 Temperatura fluido: 25 °C

	Concentrac. (g/l)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Viscosidad (Ns/m <sup>2</sup> )	Tiempo de vaciado (s)
Disolución nº 1	0,00	998,23	0,010	500
Disolución nº 2	0,50	998,73	0,060	550
Disolución nº 3	0,75	998,98	0,080	600
Disolución nº 4	1,00	999,23	0,110	665
Disolución nº 5	1,50	999,73	0,170	690
Disolución nº 6	2,00	1000,23	0,240	712

Tabla 3.1. Características de las disoluciones de goma xantana preparadas y tiempos de vaciado total (ver Anexo I).

El Gráfico 3.1 muestra los tiempos de vaciado del depósito con las diferentes disoluciones de goma xantana.

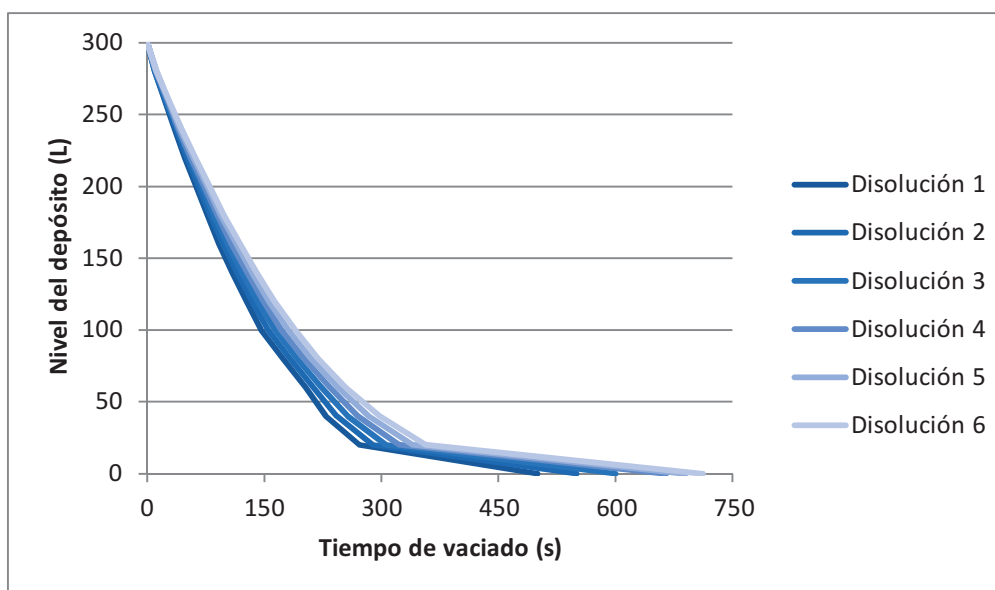


Gráfico 3.1. Tiempos de vaciado de un depósito con diferentes disoluciones de goma xantana.

La Tabla 3.2 muestra los Tiempos de vaciado (en segundos) de seis disoluciones de goma xantana en agua, evaluado a intervalos de 20 litros derramados.

Litros derramados	Disolución 1	Disolución 2	Disolución 3	Disolución 4	Disolución 5	Disolución 6
0	0	0	0	0	0	0
20	10	10	11	11	12	12
40	22	23	24	26	27	28
60	35	37	39	40	42	44
80	48	51	54	56	59	62
100	63	66	70	73	77	80
120	77	81	85	90	94	98
140	92	97	103	108	114	119
160	109	115	121	128	134	140
180	127	134	141	149	156	163
200	146	155	164	172	181	190
220	174	183	192	201	210	219
240	203	213	223	234	244	254
260	229	243	257	270	284	298
280	272	289	306	323	340	357
300	500	550	600	665	690	712

Tabla 3.2. Tiempos de vaciado (en segundos) de seis disoluciones de goma xantana en agua, evaluado a intervalos de 20 litros derramados

Los resultados de las Tablas 3.1 y 3.2 revelan que la viscosidad (variable integrante de los efectos de fricción  $\Sigma F$ ) tiene una considerable influencia en el tiempo que tardan las diferentes disoluciones en salir totalmente del depósito, por lo que el término  $\Sigma F$  no debe de ser despreciado de la ecuación [3.2]. Evaluando el tiempo de vaciado del depósito a intervalos de 20 litros derramados, se comprueba su influencia, la cual no se ve en este experimento sea afectado por la densidad ( $\rho$ ), pues prácticamente es la misma para las seis disoluciones.



### 3.3 Efectos friccionales y factor de fricción de Fanning

En los procesos de derrame, el cálculo de la energía perdida (y por tanto también de la caída de presión) debido al rozamiento superficial del fluido con las paredes internas del depósito y a las turbulencias generadas en el orificio de salida del mismo, resulta inviable cuando el flujo interno del sistema es turbulento ( $Re > 4000$ ).

Ante tal circunstancia, se debe recurrir a métodos experimentales que sean capaces de elucidar las ecuaciones empíricas que describen el proceso, lo cual no deja de ser más que un caso concreto de la ley general de rozamiento entre un sólido y un fluido en movimiento relativo, y que depende de las siguientes variables cuando la velocidad del fluido respecto al sólido es relativamente pequeña comparada con la velocidad del sonido en el fluido que se trata:

- Características del sólido: dimensiones y geometría, material, naturaleza de la superficie y rugosidad, etc.
- Características del líquido: densidad y viscosidad.
- Velocidad relativa del fluido respecto del sólido.

La función desarrollada por Fanning [3.4] relaciona tales variables con la fuerza de rozamiento, y es única para cada serie de sólidos geoméricamente semejantes. Cuenta con un factor de rozamiento  $f_F$  llamado en Ingeniería Química *factor de fricción de*

*Fanning*, que representa la energía cinética del fluido circulante que es perdida en forma de calor, y cuyo valor depende de los factores: velocidad, densidad y viscosidad del fluido, dimensiones y rugosidad relativa  $\varepsilon/d$  de la conducción.

$$\Sigma F = \frac{2f_F Lu^2}{d} \quad [3.4]$$

donde  $\Sigma F$ : pérdida de energía por unidad de masa (J/kg)  
 $f_F$ : factor de fricción de Fanning  
 $L$ : longitud de la conducción más la longitud equivalente (m)  
 $u$ : velocidad del fluido (m/s)  
 $d$ : diámetro de la conducción (m)

El valor  $f_F$  se determina mediante el uso de gráficos o expresiones empírico/teóricas (Nikuradse, Prandtl, von Karman, Colebrook, etc.) discutidas en el libro de Schlichting (1979), las cuales sólo son válidas para determinados intervalos de valores de  $Re$ . En régimen turbulento, para el intervalo de flujos que va desde valores de número de  $Re = 4 \cdot 10^3$  hasta  $Re = 10^8$ , la expresión más utilizada y que mejor se adapta a la realidad es la propuesta por Colebrook (1939):

$$\frac{1}{\sqrt{f_F}} = -4 \log \left( \frac{1}{3,7} \frac{\varepsilon}{d} + \frac{1,255}{Re \sqrt{f_F}} \right) \quad [3.5]$$

Para regímenes turbulentos o de transición, y cualquiera que sea la rugosidad del sistema, la fórmula empírica propuesta por Chen [3.6] no presenta prácticamente desviación alguna con las curvas que representan  $f_F$  frente a  $Re$  para distintos valores de rugosidad relativa  $\varepsilon/d$ , y es factible su utilización mediante el uso de ordenadores personales.



$$\frac{1}{\sqrt{f_F}} = -4 \log \left\{ \frac{1}{3,7065} \left( \frac{\varepsilon}{d} \right) - \frac{5,0452}{\text{Re}} \log \left[ \frac{1}{2,8257} \left( \frac{\varepsilon}{d} \right)^{1,1098} + \frac{5,8506}{\text{Re}^{0,8981}} \right] \right\} \quad [3.6]$$

Además de las ecuaciones [3.5] y/o [3.6], en determinados sistemas resulta conveniente, por simplicidad, considerar también la ecuación para tubos lisos [3.7] propuesta por Drew, Koo y Mc Adams (1937) que es válida para un intervalo de número de Reynolds de  $4 \cdot 10^3$  a  $3 \cdot 10^6$ .

$$f_F = 0,0014 + 0,125 \text{Re}^{-0,32} \quad [3.7]$$

Para números de Reynolds comprendidos entre  $5 \cdot 10^3$  y  $2 \cdot 10^5$ , los mismos autores proponen una expresión [3.8] más sencilla:

$$f_F = 0,046 \text{Re}^{-0,2} \quad [3.8]$$

La efectividad de todas estas fórmulas se hace patente cuando en una conducción de tubos lisos ( $\varepsilon/d \cong 0$ ) se realizan determinaciones de  $f_F$  para un determinado valor de Re, usando cada una de las ecuaciones propuestas, y comparando los resultados obtenidos (Tabla 3.3).

En la bibliografía especializada se describen muchas fórmulas que también son aplicables al factor de fricción de Fanning, como por ejemplo:

$$\frac{1}{\sqrt{f_F}} = 2,0 \log (\text{Re} \sqrt{f_F}) - 0,80 \quad [3.9]$$

$$4 f_F = 0,0056 + 0,500 (\text{Re})^{-0,32} \quad [3.10]$$

$$f_F = 0,0140 + 1,056 (\text{Re})^{-0,42} \quad [3.11]$$

$$f_F = 0,16 (\text{Re})^{-0,16} \quad [3.12]$$

Número de Reynolds (Re)	Ecuación [3.5]	Ecuación [3.6]	Ecuación [3.7]	Ecuación [3.8]
$1 \cdot 10^3$	0,01643	0,01544	0,01511	0,01155
$5 \cdot 10^3$	0,00393	0,00933	0,00959	0,00837
$1 \cdot 10^4$	0,00769	0,00772	0,00796	0,00729
$5 \cdot 10^4$	0,00516	0,00523	0,00532	0,00528
$1 \cdot 10^5$	0,00444	0,00450	0,00454	0,00460
$5 \cdot 10^5$	0,00326	0,00329	0,00328	0,00333
$1 \cdot 10^6$	0,00289	0,00291	0,00290	0,00290
$5 \cdot 10^6$	0,00224	0,00225	0,00230	0,00210
$1 \cdot 10^7$	0,00203	0,00203	0,00212	0,00183
$5 \cdot 10^7$	0,00164	0,00162	0,00183	0,00133
$1 \cdot 10^8$	0,00150	0,00148	0,00174	0,00116
$5 \cdot 10^8$	0,00125	0,00122	0,00161	0,00084

Tabla 3.3. Valores del factor de fricción  $f_F$ , en tubos lisos, calculados con las distintas ecuaciones propuestas.

### 3.4 La longitud equivalente $L_{eq}$ en los efectos friccionales

La longitud de la conducción ( $L$ ) por donde circula el fluido, es una de las variables que influye en la pérdida de energía debido al rozamiento superficial del fluido con las paredes internas del sólido que lo contiene (tubería o conducción).

Dicho término ( $L$ ), engloba también las pérdidas por fricción que experimenta el fluido al atravesar accesorios tales como: boquillas, llaves, codos, etc. a través de un término denominado *longitud equivalente*  $L_{eq}$ .

La longitud equivalente es la longitud de un tubo recto cuya pérdida friccional es equivalente a la del accesorio o accidente que se estudia, y su cálculo se suele realizar mediante el ábaco de Moody y/o las fórmulas propuestas por Crane (1982) y Perry (1950) que se presentan en la Tabla 3.4, y las propuestas por Branan (2000), siempre teniendo pleno conocimiento del régimen de circulación del fluido.

$$L = L_{\text{conduc}} + \Sigma(L_{\text{eq}})_{\text{accesorio}}$$

Así pues, el término ( $L$ ) en la ecuación de Fanning [3.4] no es más que el resultado de considerar la longitud de la conducción más la suma de todas las longitudes equivalentes de cada uno de los accesorios o accidentes que atraviesa el fluido.

En la Tabla 3.4 siguiente se indica la longitud equivalente (L) para diferentes accesorios de una tubería.

Tamaño nominal. (pulgadas)	Válvula retenc. de bola	Válvula de ángulo	Llave de macho	Válvula compuerta	Codo 45° - rosca	Codo radio corto	Codo radio largo	Te dura	Te suave	Curvas que van a inglete de 90°			Ensanchamiento					Contracción				
										2 ingletes	3 ingletes	4 ingletes	Repentino		Standard			Repentina		Standard		
													Longitud equivalente en términos del d pequeño									
										d/D = 1/4	d/D = 1/2	d/D = 3/4	d/D = 1/2	d/D = 3/4	d/D = 1/4	d/D = 1/2	d/D = 3/4	d/D = 1/2	d/D = 3/4	d/D = 1/2	d/D = 3/4	
1	55	26	7	1	1	3	2	8	2				5	3	1	4	1	3	2	1	1	
1/2	70	33	14	2	2	4	3	10	3				7	4	1	5	1	3	3	1	1	
2	80	40	16	2	2	5	3	12	3				8	5	2	6	2	4	3	2	2	
2	10	50	17	2	2	6	4	14	4				10	6	2	8	2	5	4	2	2	
1/2	0	65	30	3	3	7	5	19	5				12	8	3	10	3	6	5	3	3	
3	13	10	70	4	4	11	8	28	8				18	12	4	14	4	9	7	4	4	
4	0	0	12	6	6	15	9	37	9				25	16	5	19	5	12	9	5	5	1
6	20	12	0	7	7	18	12	47	12				31	20	7	24	7	15	12	6	6	1
8	0	5	17	9	9	22	14	55	14	28	21	20	37	24	8	28	8	18	14	7	7	2
10	26	16	0	10	10	26	16	62	16	32	24	22	42	26	9			20	16	8		
12	0	0	17	11	11	29	18	72	18	38	27	24	47	30	10			24	18	9		
14	33	19	0	12	12	33	20	82	20	42	30	28	53	35	11			26	20	10		
16	0	0	18	14	14	36	23	90	23	46	33	32	60	38	13			30	23	11		
18	40	21	0	15	15	40	25	10	25	52	36	34	65	42	14			32	25	12		
20	0	0	14	16	16	44	27	0	27	56	39	36	70	46	15			35	27	13		
22	45	24	5	21	21	55	40	11	40	70	51	44										
24	0	0	16	25	25	66	47	0	47	84	60	52										
30	50	28	0	30	30	77	55	14	55	98	69	64										
36	0	0	21	35	35	88	65	0	65	11	81	72										
42	55	30	0	40	40	99	70	17	70	2	90	80										
48	0	0	22	45	45	11	80	0	80	12	99	92										
54	65	33	5							6												
60	0	5	25			0				19												
	68	37	4							0												
	8	0	31							0												
	75		2							25												
	0									0												
										26												
										0												

Tabla 3.4. Longitud equivalente de válvulas y accesorios (en pies)

**Derrame de líquidos  
procedentes de tanques  
no presurizados.**

CAPÍTULO

**4**





## 4.1 Introducción

El desarrollo de la Industria Química durante los últimos años ha experimentado un notable incremento en las actividades de producción, almacenamiento y transporte-distribución de materias calificadas como peligrosas. Dicha actividad, entraña ciertos riesgos, que cuando coinciden una serie de circunstancias, pueden desencadenar accidentes causando daños personales, materiales y ambientales.

Las estadísticas revelan que el 97 % de dichas sustancias corresponden a las siguientes clases:

**Clase 2:** gases

**Clase 3:** líquidos inflamables

**Clase 8:** corrosivos

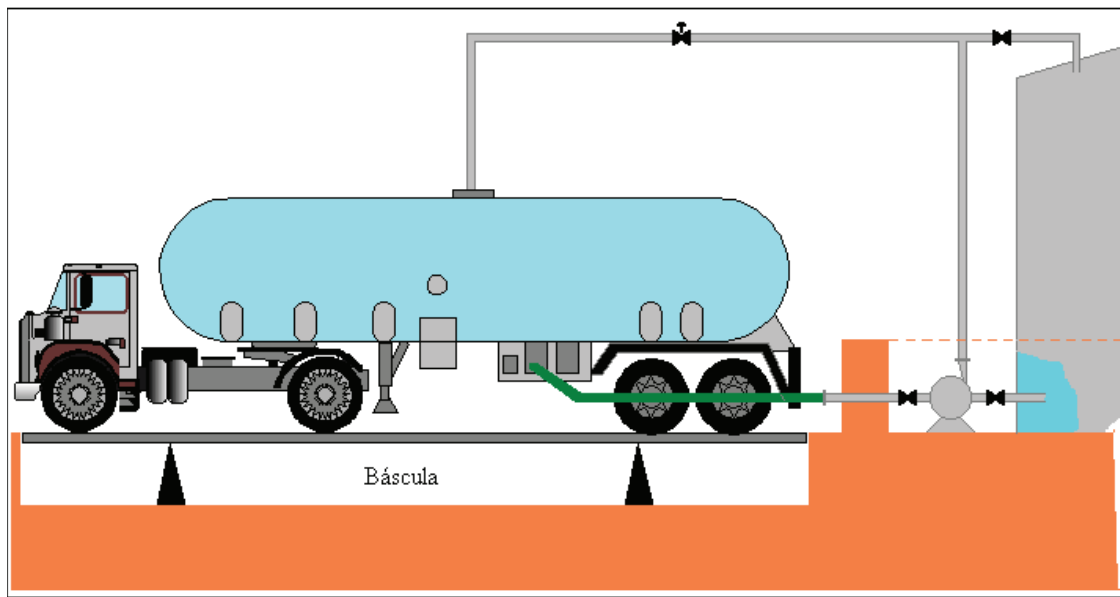
De hecho, un estudio llevado a cabo por la EPA (United States Environmental Protection Agency) reflejado en la Tabla 4.1 de este capítulo, confirma que el producto químico con mayor índice de siniestrabilidad, corresponde a los derivados del petróleo (hidrocarburos), a los que se les atribuye el 50,6 % del total de incidentes registrados.

- Fuegos
- Gasóleos
- Gasolinas



En dicho estudio, se destacan los 10 productos químicos más problemáticos, los cuales se caracterizan todos ellos por producirse en grandes volúmenes, y tener un elevado consumo, acentuándose de esta manera la probabilidad de accidentes (trasiegos entre depósitos, operaciones de carga-descarga tal como se muestra en la Figura 4.1, transporte, etc.):

La mayoría de estos productos son líquidos (muchos de ellos inflamables), que por sus propiedades se almacenan y transportan en depósitos **no presurizados**, por lo que el estudio de sus posibles derrames implicará la simplificación de ciertos factores en el balance de energía mecánica.



**Figura 4.1.** Proceso de descarga de un líquido con la ayuda de una bomba.

En función de la velocidad a la que se libera el combustible y su duración, los derrames pueden clasificarse en los siguientes tipos:





**Derrame continuo.** Se trata de un derrame que se produce de forma continua a una velocidad determinada que debe de especificarse y durante un largo periodo de tiempo.

**Derrame instantáneo.** Se trata de un derrame que ocurre en un espacio de tiempo muy corto.

**Derrame finito.** Se trata del derrame de un determinado volumen de líquido durante un periodo de tiempo. Tanto la velocidad a la que se derrama el líquido como su duración son finitas. La Tabla 4.1 muestra el porcentaje de siniestralidad de diferentes productos químicos.

Producto	Siniestralidad (%)
Hidrocarburos (derivados del petróleo)	50,6
Bifenilos policlorados (PCB)	23,0
Acido sulfúrico	6,5
Amoniaco anhidro	3,7
Cloro	3,5
Acido clorhídrico	3,1
Hidróxido sódico (sosa)	2,6
Alcohol metílico	1,7
Acido nítrico	1,7
Tolueno	1,4
Cloruro de metilo	1,4
Resto	0,8

Tabla 4.1. Estudio EPA. Incidentes producidos en las instalaciones de producción, almacenaje, uso, transporte





## 4.2 Derrames y balance de energía mecánica

Recordando que el estudio de los efectos mecánicos en el flujo de fluidos tiene como punto de partida el balance de energía mecánica, para el caso concreto del derrame de líquidos procedentes de tanques no presurizados, este se regirá por la ecuación fundamental a partir de la cual se podrá evaluar el tiempo que tarda en vaciarse un depósito. Su forma integrada [4.1], se divide en cuatro términos que pueden ser sometidos a una serie de simplificaciones para el caso concreto que se estudia.

$$g \Delta z + \frac{u_1^2}{2} + \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{2f_F L u_1^2}{d} = 0 \quad [4.1]$$

Los cuatro términos son los siguientes:

### 1 Término de energía potencial

En el contexto de la Ingeniería Química, este término sólo tiene en cuenta la influencia que ejerce el campo gravitatorio sobre el fluido.

$$g \Delta z$$



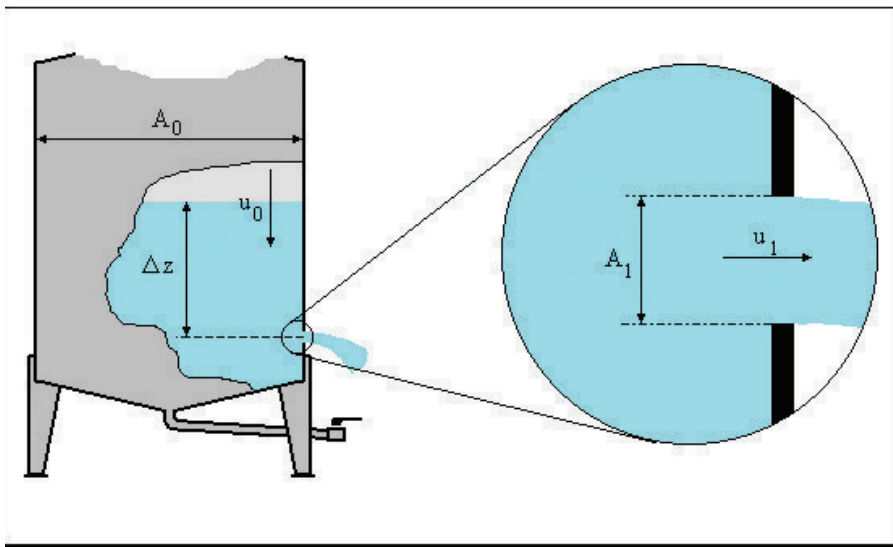
## 2 Término de energía cinética

Durante el vaciado de un depósito, la velocidad de salida del líquido ( $u_1$ ) a través del orificio va disminuyendo conforme desciende el nivel del mismo ( $\Delta z$ ) en el interior del tanque.

Como el régimen de este proceso es estacionario y además, el fluido según lo establecido anteriormente es incompresible ( $\rho_0$  y  $\rho_1 = \text{cte.}$ ), el caudal másico de salida del derrame, coincidirá con el de descenso de nivel del fluido cumpliéndose el principio de conservación de la masa, por lo que:

$$Q_{L0} \rho_0 = Q_{L1} \rho_1 \quad \therefore \quad Q_{L0} = Q_{L1} \rightarrow A_0 u_0 = A_1 u_1$$

La Figura 4.2 muestra los parámetros que intervienen en el derrame de fluidos.



**Figura 4.2.** Parámetros que intervienen en el derrame de fluidos.



donde:	$Q_{Li}$ :	caudal volumétrico del fluido ( $m^3/s$ )
	$\rho_i$ :	densidad del fluido ( $kg/m^3$ )
	$u_i$ :	velocidad del fluido ( $m/s$ )
	$A_i$ :	superficie ( $m^2$ )
	subíndice 0:	interior del depósito
	subíndice 1:	orificio

Dado que la velocidad de descenso del nivel del fluido en el interior del depósito ( $u_0$ ) es despreciable frente a la velocidad de salida del mismo ( $u_1$ ), y que  $A_0 \gg A_1$ , como se puede apreciar en la Figura 4.2, el término de energía cinética queda reducido a la siguiente expresión:

$$\Delta\left(\frac{u^2}{2\alpha}\right) = \left(\frac{u_1^2}{2\alpha_1} - \frac{u_0^2}{2\alpha_0}\right) \cong \frac{u_1^2}{2\alpha_0}$$

en el que  $\alpha$ . es un parámetro adimensional que depende del tipo de circulación del fluido ( $\alpha = 0,5$  para flujo laminar y  $\alpha = 1$  para flujo turbulento).

Ya que habitualmente la circulación de un fluido por un estrechamiento (diafragma, boquilla, etc.) es turbulenta ( $Re > 4000$ ) -para que el régimen fuera laminar en tales condiciones, sería preciso unas velocidades de circulación muy lentas y/o viscosidades muy altas- el término de energía cinética a considerar es pues el siguiente:

$$\Delta\left(\frac{u^2}{2\alpha}\right) \cong \frac{u_1^2}{2} \quad [4.2]$$



### 3 Término de energía de flujo

Para algunos autores llamado también "*carga de presión*", considerado el fluido que se derrama como un líquido incompresible, en el que por tanto no se aprecian cambios en la densidad ( $\rho = \text{cte.}$ ), el término correspondiente al trabajo de flujo en el balance de energía mecánica, queda simplificado muy considerablemente:

$$\int \frac{dP}{\rho} = \frac{1}{\rho} \int dP = \frac{\Delta P}{\rho} \quad [4.3]$$

### 4 Término de pérdida friccional $\Sigma F$

La pérdida de energía mecánica por unidad de masa  $\Sigma F$ , que se manifiesta en el sistema, básicamente como calor generado, es un término que viene regulado por la conocida ecuación de *Fanning* [3.4]:

$$\Sigma F = \frac{2 f_F L u^2}{d}$$

### Factor de fricción de Fanning $f_F$

Cuando un fluido newtoniano (aquel en el que el desplazamiento relativo de los elementos del fluido al circular uno sobre otro es proporcional al esfuerzo constante sobre el fluido) circula por una conducción, parte de su energía cinética se disipa por fricción en forma de calor, denominando a la razón de esta pérdida: factor de fricción de Fanning  $f_F$  o de Darcy  $f_D$ . Ambos están relacionados por la siguiente expresión:



$$f_F = \frac{f_D}{4}$$

Su determinación se realiza tomando medidas experimentales en el sistema concreto, bien con métodos gráficos, o bien mediante el uso de fórmulas empíricas. Concretamente, para el caso del derrame de líquidos procedentes de tanques no presurizados, la fórmula considerada es una de las indicadas en el tema anterior para el caso concreto de tubos lisos [3.7], la cual fue propuesta por Drew, Koo y Mc Adams:

$$f_F = 0,0014 + 0,125 \text{Re}^{-0,32}$$

por presentar las siguientes ventajas:

- es válida para un intervalo de números de Reynolds que va de  $4 \cdot 10^3$  a  $3 \cdot 10^6$  (flujo turbulento).
- permite facilidad de cálculo frente a otras más complejas.
- ha sido contrastada con más de 1.300 experimentos.

### **Longitud equivalente $L_{eq}$**

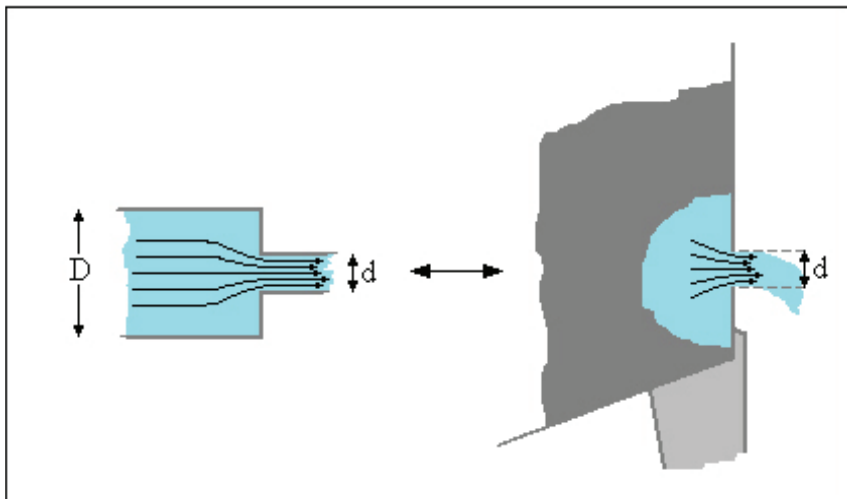
Si se considera al orificio por donde se derrama el fluido (y por tanto nula la longitud de la conducción  $L_{conduc}$ ) similar a una boquilla y se compara su pérdida friccional a la que experimenta un fluido que circula por una tubería de gran diámetro "D" al encontrarse con una reducción brusca a un diámetro mucho menor "d" (Figura 4.2), la longitud equivalente de tal accidente puede determinarse utilizando las escalas del ábaco de Moody (embocadura ordinaria), con las que se llega a la siguiente regresión potencial [4.4] con un coeficiente de correlación  $R^2 = 0,99$ :



$$L_{eq} = 0,548 (100 d)^{1,09} \quad [4.4]$$

donde: **L<sub>eq</sub>**: longitud equivalente (m)  
**d**: diámetro del orificio (m)

La Figura 4.3 muestra la comparación de una contracción brusca en una conducción con el orificio (boquilla) de un depósito.



**Figura 4.3.** Comparación de una contracción brusca en una Conducción con el orificio (boquilla) de un depósito.





### 4.3 Determinación de la velocidad de un derrame $u_1$

Considerando todas las simplificaciones descritas en el punto anterior 4.2, y despreciando el término de trabajo debido al flujo, por no influir la variable presión en este tipo de derrames, el balance de energía mecánica en su forma integrada queda reducido a la siguiente expresión:

$$g \Delta z + \frac{u_1^2}{2} + u_1^2 165,5 d^{0,09} \left[ 0,0014 + 0,125 \left( \frac{\mu}{\rho u_1 d} \right)^{0,32} \right] = 0 \quad [4.5]$$

$$u_1^2 = \frac{-2 g \Delta z}{1 + 331 d^{0,09} \left[ 0,0014 + 0,125 \left( \frac{\mu}{\rho u_1 d} \right)^{0,32} \right]} \quad [4.5bis]$$

Ecuación difícil de resolver si no se utilizan aproximaciones o métodos iterativos matemáticos. De hecho, considerando las expresiones [4.1] y [4.5bis], ambas relacionadas, se observa que al despejar en ambas la velocidad de flujo ( $u^2$ ), sus denominadores son expresiones que en condiciones ideales de rozamiento, etc. tienden a



valer 1, pues su segundo sumando, en el que incluye los factores  $f_F$  y  $L$ , sería despreciable (nulo). La equivalencia entre las expresiones indicadas es la siguiente:

$$331 d^{0,09} \left[ 0,0014 + 0,125 \left( \frac{\mu}{\rho u_0 d} \right)^{0,32} \right] \leftrightarrow \frac{4 f_F L}{d}$$

En tales casos, es habitual en ingeniería el buscar un polinomio de grado prefijado, cuyo valor en un punto determinado  $c$ , sea aproximado al de la función inicial  $f(u)$  en este mismo punto  $c$  (Teorema de Taylor). Así, el denominador de la ecuación [4.5] cuyo valor tiende a la unidad en condiciones de idealidad, podrá ser sustituido por un desarrollo de Taylor  $P(u)$ , que en el punto  $c = 1$  corresponderá a la siguiente expresión:

$$P(u) = 1 + 331 d^{0,09} \left[ 0,0014 + 0,125 \left( \frac{\mu}{\rho d} \right)^{0,32} \right] + \left[ -13,24 d^{0,09} \left( \frac{\mu}{\rho d} \right)^{0,32} \right] \frac{(u-1)^1}{1!} + \dots$$

Ciertamente, parece que sustituir el denominador de la ecuación [4.5] por el desarrollo  $P(u)$  en el punto  $c = 1$  complica todavía más la resolución de la ecuación. Ahora bien, si se acepta la aproximación de considerar solamente el término independiente del polinomio, la fórmula resulta mucho más sencilla.

Para confirmar la validez de tal aproximación, es suficiente realizar cálculos con diferentes sustancias químicas, y determinar el valor de la velocidad  $u_1$  tomando solo el término independiente del polinomio ( $u_{11}$ ), y el valor de  $u_1$  considerando el término independiente más el término de primer grado en el punto  $c = 1$  ( $u_{12}$ ). Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 4.2.



Sustancia	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Viscosidad [Ns/m <sup>2</sup> ]	u <sub>11</sub> [m/s]	u <sub>12</sub> [m/s]	Diferencia u <sub>11</sub> - u <sub>12</sub>
Benceno	885	6,47·10 <sup>-4</sup>	4,0427	3,9470	2,37 %
Tolueno	867	5,90·10 <sup>-4</sup>	4,0464	3,9525	2,31 %
Agua	998	1,01·10 <sup>-3</sup>	4,0250	3,9206	2,59 %
Etanol 96 % vol.	789	1,19·10 <sup>-3</sup>	4,0011	3,8851	2,90 %
Anilina	1022	4,47·10 <sup>-3</sup>	3,9230	3,7716	3,86 %
Acido sulfúrico 66° B	1836	2,52·10 <sup>-2</sup>	3,8119	3,6157	5,15 %

Tabla 4.2. Velocidad de derrame de diferentes sustancias químicas a 20 °C, usando diferentes términos del polinomio P(u).

De este modo, la ecuación de la velocidad de derrame  $u_1$ , queda reducida a la expresión [4.6], la cual presenta una estructura similar a la utilizada por diferentes programas informáticos consultados:

- CHEMS-PLUS (Chemical Hazard Evaluation Methodologies), versión 1.0
- ELSA (Emergency Level Scale Assessment), versión 7.0
- EPI (Emergenci Prediction Information), versión 5.0
- ARCHIE (Automated Resource for Chemical Hazard Incident Evaluation), versión 1.0

$$u_1^2 = \frac{-2 g \Delta z}{1 + 331 d^{0,09} \left[ 0,0014 + 0,125 \left( \frac{\mu}{\rho d} \right)^{0,32} \right]} \quad [4.6]$$

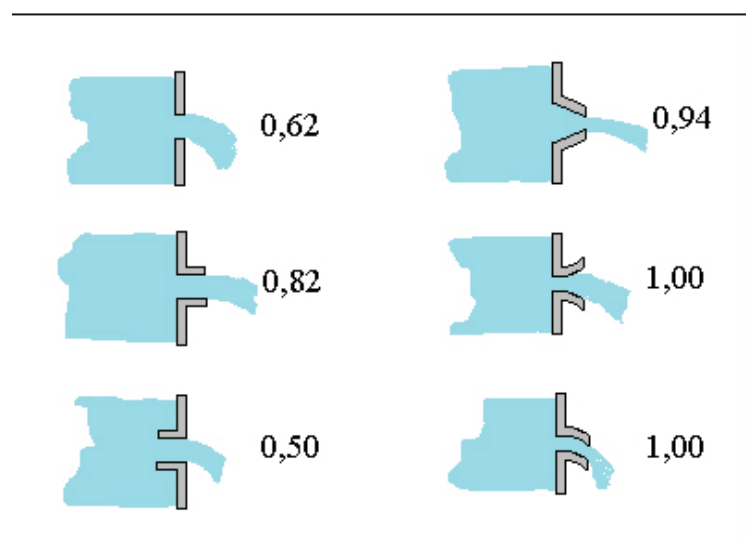




#### 4.4 Coeficiente de descarga $C_d$

El *coeficiente de descarga*  $C_d$  es un factor de corrección cuya función es la de contrarrestar las diferencias existentes entre los resultados experimentales y teóricos, debido a las simplificaciones realizadas, y la incertidumbre acerca del flujo en la boquilla, orificio, etc., los cuales habitualmente no tienen una forma perfectamente circular.

Normalmente se toma como predeterminado el valor  $C_d = 0,62$ , aunque dependiendo del tipo-forma de la boquilla, la bibliografía especializada propone los siguientes valores (Figura 4.4):



**Figura 4.4.** Coeficientes de descarga  $C_d$  de diferentes boquillas.



de este modo, la ecuación de la velocidad de derrame corresponderá a la expresión [4.7]:

$$u_1 = C_d \sqrt{\frac{-2 g \Delta z}{1 + 331 d^{0,09} \left[ 0,0014 + 0,125 \left( \frac{\mu}{\rho d} \right)^{0,32} \right]}} \quad [4.7]$$



## 4.5 Estimación del tiempo de derrame

Cuando se está derramando un líquido contenido en un tanque, su velocidad de salida ( $u_1$ ) va disminuyendo conforme desciende el nivel  $\Delta z$  en el interior del depósito, tal como prevé la ecuación [4.7]; el tiempo que tarda en vaciarse el depósito, también depende de este nivel.

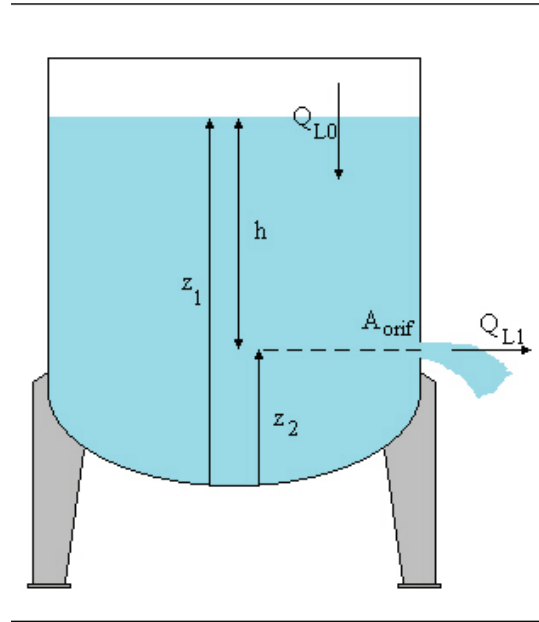
Para su estimación, se parte de la definición del caudal volumétrico  $Q_L$ , que aplicada al orificio de salida del depósito (Figura 4.4) para un fluido de densidad constante ( $\rho_0 = \rho_1 = \text{cte.}$ ), se corresponde con la expresión:

$$Q_{L0} \rho_0 = Q_{L1} \rho_1 \quad \therefore \quad Q_{L1} = Q_{L0} = \frac{dV}{dt} = \frac{A_0 dz}{dt}$$

El tiempo de vaciado vendrá dado por la siguiente ecuación diferencial [4.8], cuya resolución dependerá del volumen y de la geometría del depósito ( $dV = A_0 dz$ ).

La Figura 4.5 muestra el caudal volumétrico de un líquido que sale de un depósito

$$dt = \frac{A_0 dz}{Q_{L1}} = \frac{A_0 dz}{A_{\text{orif}} u_1} = \frac{A_0}{A_{\text{orif}} C_d} \frac{dz}{\sqrt{\frac{-2g \Delta z}{1 + 331 d^{0,09} \left[ 0,0014 + 0,125 \left( \frac{\mu}{\rho d} \right)^{0,32} \right]}}} \quad [4.8]$$



**Figura 4.5.** Caudal volumétrico de un líquido que sale de un depósito.

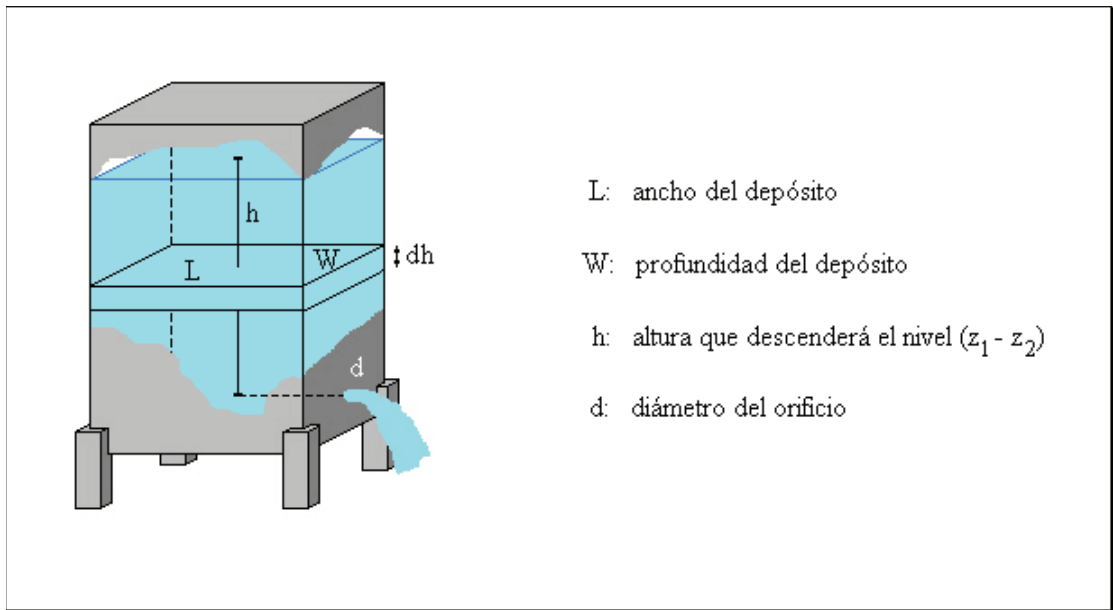
### Tanque rectangular fondo plano

El tiempo de derrame de un depósito rectangular cuyas dimensiones de anchura y profundidad son respectivamente  $L$  y  $W$ , se determinará aplicando la ecuación [4.8] juntamente con las variables que definen su geometría (Figura 4.6)

Considerando la variación del nivel del líquido en el depósito como  $h = z_1 - z_2 = -\Delta z$  (véase el esquema de la Figura 4.5), la ecuación a resolver queda modificada a la siguiente expresión:

$$dt = \frac{-WL}{\pi \frac{d^2}{4} C_d} \frac{dh}{\sqrt{\frac{2gh}{1 + 331d^{0,09} \left[ 0,0014 + 0,125 \left( \frac{\mu}{\rho d} \right)^{0,32} \right]}}}$$





**Figura 4.6.** Variables y geometría de un tanque rectangular fondo plano.

que se resuelve integrando entre los límites  $h_{\text{inicial}} = h$  y  $h_{\text{final}} = 0$ , los cuales corresponden al descenso de nivel que experimentará el fluido en el proceso de vaciado.

$$t = \frac{-4 W L}{\pi d^2 C_d} \sqrt{\frac{1 + 331 d^{0,09} \left[ 0,0014 + 0,125 \left( \frac{\mu}{\rho d} \right)^{0,32} \right]}{2 g}} \int_h^0 \frac{dh}{\sqrt{h}}$$

Una vez integrada, resulta la expresión [4.9] que es la que permite determinar el tiempo que tarda en vaciarse un depósito cuadrado de fondo plano que contiene un líquido de densidad  $\rho$  y viscosidad  $\mu$ .

$$t = \frac{8 W L}{\pi d^2 C_d} \sqrt{\frac{1 + 331 d^{0,09} \left[ 0,0014 + 0,125 \left( \frac{\mu}{\rho d} \right)^{0,32} \right]}{2 g}} \sqrt{h} \quad [4.9]$$

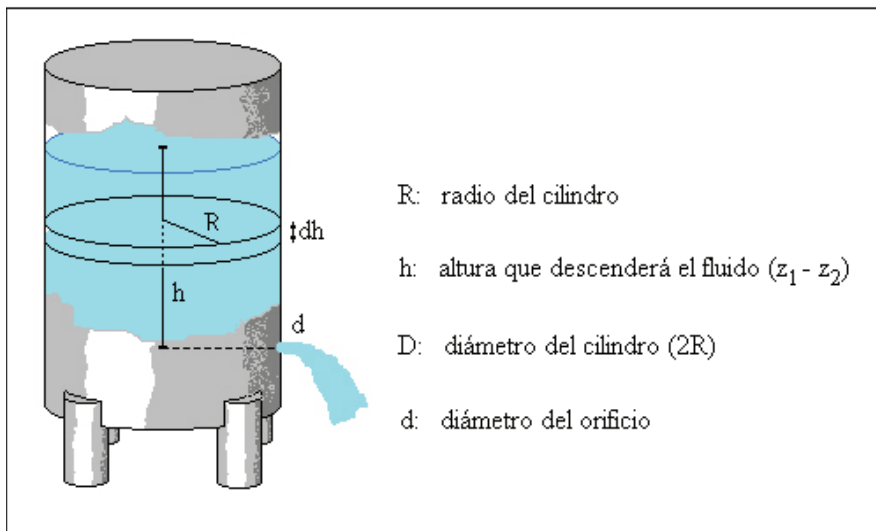


$$t = \frac{-8 W L}{\pi d^2 C_d} \sqrt{\frac{1 + 331 d^{0,09} \left[ 0,0014 + 0,125 \left( \frac{\mu}{\rho d} \right)^{0,32} \right]}{2 g}} \left[ \sqrt{h_1} - \sqrt{h_0} \right] \quad [4.9bis]$$

Siendo  $h_0$ : la altura inicial  
 $h_1$ : la altura final

### Tanque cilíndrico vertical

Siguiendo un desarrollo idéntico al del depósito cuadrado de fondo plano, la Figura 4.7 muestra las variables y geometría de un tanque cilíndrico vertical. Considerando también que  $h = z_1 - z_2 = -\Delta z$ , mediante la ecuación [4.8] el tiempo de derrame vendrá dado por el siguiente desarrollo.



**Figura 4.7.** Variables y geometría de un tanque cilíndrico vertical.



$$t = \frac{-\pi \frac{D^2}{4}}{\pi \frac{d^2}{4} C_d} \int_h^0 \frac{dh}{\sqrt{h}} \sqrt{\frac{1 + 331 d^{0,09} \left[ 0,0014 + 0,125 \left( \frac{\mu}{\rho d} \right)^{0,32} \right]}{2g}}$$

que en su forma integrada corresponde a:

$$t = \frac{2 D^2}{d^2 C_d} \sqrt{\frac{1 + 331 d^{0,09} \left[ 0,0014 + 0,125 \left( \frac{\mu}{\rho d} \right)^{0,32} \right]}{2g}} \sqrt{h} \quad [4.10]$$

$$t = \frac{-2 D^2}{d^2 C_d} \sqrt{\frac{1 + 331 d^{0,09} \left[ 0,0014 + 0,125 \left( \frac{\mu}{\rho d} \right)^{0,32} \right]}{2g}} \left[ \sqrt{h_1} - \sqrt{h_0} \right] \quad [4.10 \text{ bis}]$$

Siendo en esta ecuación

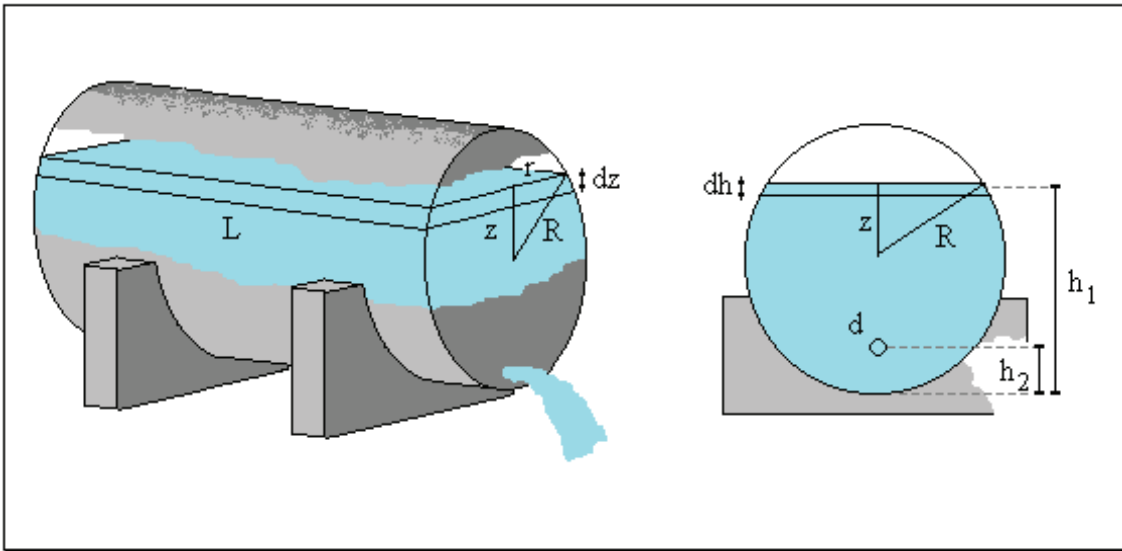
$h_0$ : la altura inicial del fluido

$h_1$ : la altura final del fluido

### Tanque cilíndrico horizontal

Típico de las unidades de transporte (camiones cisterna), los cálculos se realizan siguiendo la misma metódica que en los otros apartados, y presentando un especial interés en cómo se obtiene la expresión de  $dV$  en función de  $h$ :

La Figura 4.8 muestra las variables y geometría de un tanque cilíndrico horizontal.



**Figura 4.8.** Variables y geometría de un tanque cilíndrico horizontal.

$$dV = L 2r dz \quad \therefore \quad dV = 2L \sqrt{R^2 - z^2} dz$$

Mediante un cambio en el sistema de referencia, de manera que el centro de coordenadas pase de estar en el centro de la circunferencia al punto más bajo de la misma (base del depósito), y representando la altura por  $h$  y no por  $z$ , ambas variables relacionadas por la expresión:  $z = h - R$ , el elemento diferencial de volumen queda de la siguiente forma:

$$dV = 2L \sqrt{2Rh - h^2} dh$$

que sustituido en la ecuación diferencial [4.8] nos da:

$$t = \frac{-2L}{\pi \frac{d^2}{4} C_d} \sqrt{\frac{1 + 331 d^{0.09} \left[ 0,0014 + 0,125 \left( \frac{\mu}{\rho d} \right)^{0,32} \right]}{2g}} \int_{h_1}^{h_2} \sqrt{\frac{2Rh - h^2}{h}} dh$$

Integral que se resuelve con un cambio de variable  $\theta = 2R - h$ ; y cuya solución es:



$$t = \frac{16 L}{3 \pi d^2 C_d} \sqrt{\frac{1 + 331 d^{0,09} \left[ 0,0014 + 0,125 \left( \frac{\mu}{\rho d} \right)^{0,32} \right]}{2 g}} \left[ \sqrt{(2R - h_2)^3} - \sqrt{(2R - h_1)^3} \right] \quad [4.11]$$

### Tanque esférico

La ecuación que evalúa el tiempo que tarda en vaciarse un tanque esférico se determina siguiendo las mismas pautas que en el apartado del tanque cilíndrico horizontal, prestando también un especial interés en como se obtiene la expresión de  $dV$  en función de  $h$ .

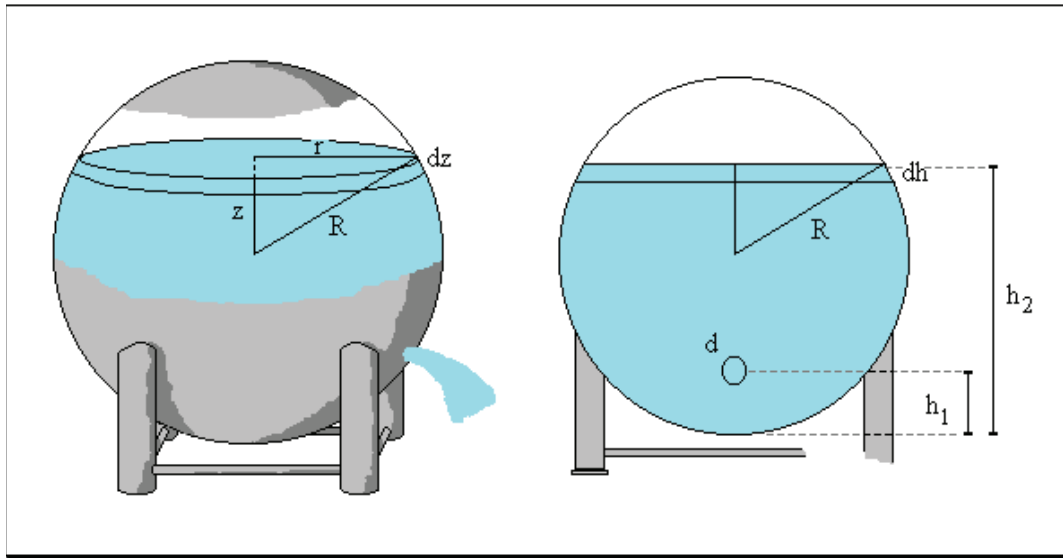
$$h = R + z \quad \therefore \quad r = \sqrt{R^2 - (h - R)^2}$$

$$dV = \pi r^2 dz = \pi [R^2 - (h - R)^2] dh$$

Aplicando la ecuación [4.8] a este sistema, se obtienen los siguientes resultados:

$$t = \frac{-4}{d^2 C_d} \sqrt{\frac{1 + 331 d^{0,09} \left[ 0,0014 + 0,125 \left( \frac{\mu}{\rho d} \right)^{0,32} \right]}{2 g}} \int_{h_2}^{h_1} \frac{2Rh - h^2}{\sqrt{h}} dh$$

La Figura 4.9 muestra las variables y geometría de un tanque esférico.



**Figura 4.9.** Variables y geometría de un tanque esférico.

que una vez integrada da la siguiente ecuación [4.12]:

$$t = \frac{8}{15d^2 C_d} \sqrt{\frac{1 + 331 d^{0,09} \left[ 0,0014 + 0,125 \left( \frac{\mu}{\rho d} \right)^{0,32} \right]}{2g}} \left[ (10R\sqrt{h_1^3} - 3\sqrt{h_1^5}) - (10R\sqrt{h_2^3} - 3\sqrt{h_2^5}) \right]$$



## 4.6 Cálculos experimentales

Las diferentes fórmulas obtenidas en este capítulo ponen de manifiesto la importancia que tienen la geometría del depósito que contiene un fluido y los factores densidad ( $\rho$ ) y viscosidad ( $\mu$ ) del mismo, en los cálculos de estimación del tiempo que tarda en vaciarse un depósito.

La Tabla 4.3 muestra las características físico-químicas de productos derivados del petróleo

Producto	Viscosidad (Pa·s = Ns/m <sup>2</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
Queroseno – Jet A1	$1 \cdot 10^{-3}$	804
Gasolina automoción	$0,6 \cdot 10^{-3}$	739
Gasóleo A	$6,02 \cdot 10^{-3}$	860
Gasóleo C	$10,5 \cdot 10^{-3}$	880
Fuel-oil nº 1	$1 \cdot 10^{-3}$	840
Fuel-oil nº 2	$5 \cdot 10^{-3}$	866

Tabla 4.3. Características físico-químicas de productos derivados del petróleo

Tomando como referencia las dimensiones reales de los depósitos existentes en la Compañía Logística de Hidrocarburos: CLH-Baleares, factoría de "Son Banya", se puede



observar los resultados que presentan los supuestos prácticos que se muestran en la Tabla 4.4.

Número depósitos	Tipo de depósito	Contenido	Capacidad (m <sup>3</sup> )
3	Cilíndrico vertical	Gasolina	3.700
1	Cilíndrico vertical	Gasóleo A	26.590
2	Cilíndrico vertical	Queroseno – Jet A1	26.590
2	Cilíndrico vertical	Separación interfases	942

Tabla 4.4. Inventario depósitos de la compañía logística de hidrocarburos – Son Banya

### Supuesto 1 - Depósito cuadrado de fondo plano

Las características son las siguientes:

Depósito:	cuadrado fondo plano
Dimensiones:	20 x 20 x 7 m
Capacidad:	2800 m <sup>3</sup>
Contenido:	2000 m <sup>3</sup> de producto
Diámetro orificio:	0,005 m
Altura orificio:	0 m
C <sub>d</sub> :	0,62
Temperatura:	20 °C

La primera variable a determinar para poder calcular el tiempo que tardará en vaciarse un depósito consiste en saber qué nivel o altura (h) alcanza el producto en el interior del depósito.

$$20 \cdot 20 \cdot h = 2000 \quad \therefore \quad h = 5 \text{ m}$$



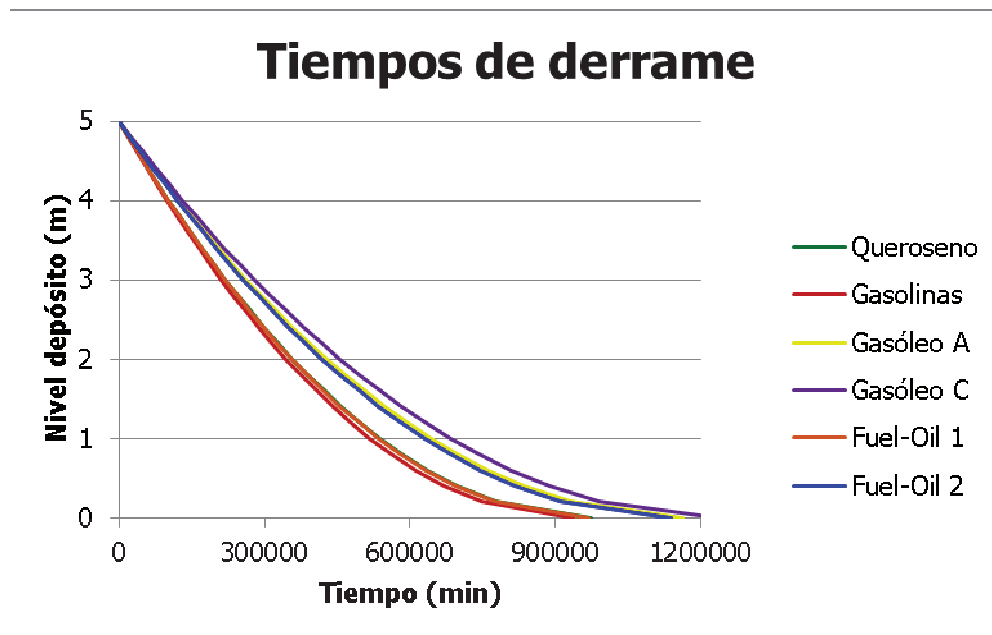


Acto seguido, basta aplicar la fórmula [4.9] ó [4.9 bis] a los diferentes productos (queroseno, gasolina, gasóleos, etc.) registrándose los resultados que se exponen en la Tabla [4.5] de la página siguiente.

Una representación gráfica de los mismos resulta mucho más indicativa de la evolución del proceso de vaciado para cada compuesto (Gráfica 4.1).

Nivel (m)	Queroseno	Gasolinas	Gasóleo A	Gasóleo C	Fuel-Oil 1	Fuel-Oil 2
5,0	0	0	0	0	0	0
4,8	19663	18917	23520	25023	19583	23016
4,6	39740	38232	47535	50573	39578	46517
4,4	60258	57972	72078	76685	60013	70535
4,2	81248	78165	97186	103398	80918	95105
4,0	102744	98846	122899	130754	102326	120267
3,8	124785	120050	149263	158803	124277	146066
3,6	147414	141820	176330	187601	146814	172554
3,4	170680	164204	204161	217210	169986	199789
3,2	194642	187256	232823	247704	193850	227837
3,0	219364	211041	262395	279167	218472	256776
2,8	244926	235632	292971	311697	243929	286696
2,6	271418	261119	324659	345411	270313	317706
2,4	298950	287606	357592	380448	297733	349934
2,2	327655	315222	391928	416979	326322	383534
2,0	357697	344125	427864	455211	356242	418700
1,8	389283	374512	465645	495408	387699	455673
1,6	422679	406640	505592	537907	420959	494764
1,4	458235	440847	548123	583157	456370	536384
1,2	496436	477599	593817	631772	494415	581099
1,0	537976	517563	643506	684637	535787	629725
0,8	583925	561768	698468	743112	581549	683510
0,6	636079	611943	760853	809484	633491	744558
0,4	697944	670460	834853	888214	695103	816973
0,2	778567	748024	931291	990816	775399	911346
0,0	973209	935803	1164114	1238520	969248	1139183

Tabla 4.5. Tiempos de vaciado en (minutos)



**Gráfica 4.1.** Variación del tiempo de vaciado con el nivel de diferentes derivados del petróleo.

El uso del programa informático APPO para este mismo supuesto, aporta las siguientes ventajas en relación a los cálculos manuales u anteriores programas informáticos:

- Mayor rapidez de cálculo.
- Más seguridad en las operaciones matemáticas (no equivocaciones).
- Aporta las constantes físico-químicas de la materia peligrosa implicada en el accidente que son necesarias para realizar los cálculos.
- Los resultados junto con los "datos de inicio" aparecen todos en una misma pantalla: toda la información en un único campo visual.
- Permite enlazar los resultados a posibles nuevas situaciones: área del derrame, incendio, explosión, etc.

El Esquema 4.1 muestra la pantalla de entrada y salida de datos de una simulación de un vertido de Gasolina de automoción de 95 octanos de un depósito de base rectangular.

SAPPO  
Archivo Consultas Emergencias NTP Recursos ?

**GASOLINA AUTOMOCION 95** **Nº ONU: 1203** **FICHA DE SEGURIDAD**

Derrame de líquidos  
Derrame de un gas  
Area de un derrame  
Evaporación de derrames  
Combustión de derrames  
Jet-flame  
BLEVE  
Explosiones  
SALIR

**Clase de Depósito**

Cuadrado  
 Cilíndrico horizontal  
 Cilíndrico vertical  
 Esférico

Alta: 7 [metros]  
Lado 1: 20 [metros]  
Lado 2: 20 [metros]  
Radio: [metros]

**Condiciones del fluido**

Temperatura en el interior del depósito: 20 [°C]  
Contenido:  masa [kg]  volumen 2000000 [litros]

**Orificio - características**

Coef. descarga Cd: 0,62  
Diámetro orificio: 0,5 (cm)  
Alta desde base: 0 [metros]

Tiempo que tarda en vaciarse el depósito: 15596 [hrs] 43 [min] 0 [seg] 935803 [min]  
Litros derramados: 2000000

TIEMPO [minutos] LITROS en tanque LITROS derramados

TIEMPO [minutos]	LITROS en tanque	LITROS derramados
0	2000000	0
103978	1580246	419754
207956	1209876	790124
311934	888888	1111112
415912	617283	1382717
519890	395061	1604939
623868	222222	1777778
727846	98765	1901235
831825	24691	1975309
935803	0	2000000

OTRO CALCULO

**Esquema 4.1.** Pantalla de entrada y salida de datos de una simulación de un vertido de Gasolina de automoción de 95 octanos.

## Supuesto 2 – Depósito cilíndrico vertical

Características:

Depósito: cilíndrico vertical  
 Diámetro base: 19 m  
 Alta depósito: 10 m  
 Capacidad: 2830 m<sup>3</sup>  
 Contenido: 2000 m<sup>3</sup> de producto  
 Diámetro orificio: 0,005 m  
 Alta orificio: 0 m  
 C<sub>d</sub>: 0,62  
 Temperatura: 20 °C



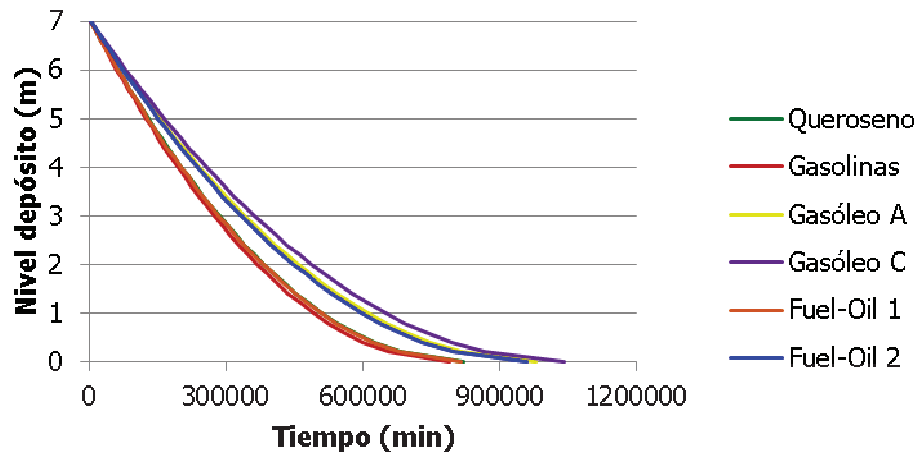
La altura-nivel del producto en el interior del tanque se determina mediante la fórmula del volumen de un cilindro:  $\pi \cdot 9,5^2 \cdot h = 2000 \quad \therefore \quad h = 7,05 \text{ m}$

Aplicando la fórmula [4.10] ó [4.10 bis] se obtienen los valores que a continuación se indican en la Tabla [4.6] y Gráfica 4.2.

Nivel (m)	Queroseno	Gasolinas	Gasóleo A	Gasóleo C	Fuel-Oil 1	Fuel-Oil 2
7,05	0	0	0	0	0	0
6,8	14647	14091	17520	18640	14588	17145
6,6	26560	25552	31770	33801	26452	31090
6,4	38655	37188	46237	49193	38497	45247
6,2	50940	49007	60932	64827	50733	59627
6,0	63425	61018	75866	80715	63167	74241
5,8	76120	73231	91051	96871	75810	89101
5,6	89035	85657	106501	113308	88673	104220
5,4	102184	98306	122228	130041	101768	119611
5,2	115578	111192	138250	147086	115108	135289
5,0	129232	124329	154583	164463	128707	151272
4,8	143163	137731	171246	182191	142580	167578
4,6	157387	151415	188260	200293	156746	184228
4,4	171923	165399	205648	218792	171223	201243
4,2	186794	179706	223435	237717	186034	218650
4,0	202023	194357	241652	257098	201201	236477
3,8	217638	209380	260330	276969	216752	254755
3,6	233670	224803	279506	297372	232719	273520
3,4	250153	240661	299223	318349	249135	292815
3,2	267129	256993	319529	339952	266042	312686
3,0	284644	273843	340480	362242	283486	333188
2,8	302753	291265	362142	385289	301521	354386
2,6	321522	309322	384592	409174	320213	376355
2,4	341027	328087	407923	433997	339639	399187
2,2	361364	347652	432249	459877	359893	422992
2,0	382648	368128	457708	486963	381091	447906
1,8	405025	389657	484475	515441	403377	474099
1,6	428684	412418	512775	545551	426940	501794
1,4	453875	436653	542907	577608	452028	531280
1,2	480939	462689	575280	612050	478981	562959
1,0	510369	491003	610483	649503	508292	597409
0,8	542922	522325	649421	690930	540712	635513
0,6	579871	557875	693619	737953	577511	678764
0,4	623699	600039	746045	793730	621161	730067
0,2	680818	654992	814368	866419	678047	796927
0,0	818714	787667	979314	1041909	815383	958340

Tabla 4.6. Tiempos de vaciado en (minutos)

## Tiempos de derrame



**Gráfica 4.2.** Variación del tiempo de vaciado de un depósito en función del nivel del líquido para diferentes derivados del petróleo.

El uso del programa informático APPO en este mismo supuesto corresponde al Esquema 4.2.

**SAPPO**  
 Archivo Consultas Emergencias NTP Recursos ?

**GASOLINA AUTOMOCION 95**      **Nº ONU: 1203**      **FICHA DE SEGURIDAD**

**Clase de Depósito**

Cuadrado       Cilíndrico horizontal       Cilíndrico vertical       Esférico

Altura: 30 [metros]  
 Lado 1: [metros]  
 Lado 2: [metros]  
 Radio: 9,5 [metros]

**Condiciones del fluido**

Temperatura en el interior del depósito: 20 [°C]  
 Contenido:  masa [kg]       volumen: 2000000 [litros]

**Orificio - características**

Coef. descarga  $C_d$ : 0,62  
 Diámetro orificio: 0,5 (cm)  
 Altura desde base: 0 [metros]

Tempo que tarda en vaciarse el depósito: 13127 [hrs] 47 [min] 0 [seg] 787667 [min]

Litros derramados: 2000000

**TIEMPO (minutos)**      **LITROS en tanque**      **LITROS derramados**

TIEMPO (minutos)	LITROS en tanque	LITROS derramados
0	2000000	0
87518	1580296	419754
175037	1209876	790124
262555	888888	1111112
350074	617283	1382717
437593	395061	1604939
525111	222222	1777778
612630	98765	1901235
700148	24691	1975309
787667	0	2000000

**OTRO CALCULO**

**Esquema 4.2.** Pantalla de entrada y salida de datos para la estimación del tiempo de vaciado de un depósito cilíndrico, mediante el modelo informático APPO.

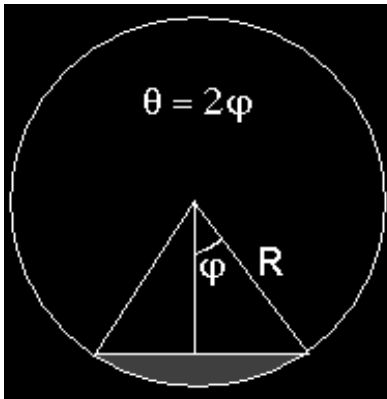


### Supuesto 3 – Depósito cilíndrico horizontal

Características:

Depósito:	cilíndrico horizontal
Diámetro base:	19 m
Longitud depósito:	10 m
Capacidad:	2830 m <sup>3</sup>
Contenido:	2005 m <sup>3</sup> de producto
Diámetro orif.:	0,005 m
Altura orificio:	0 m
C <sub>d</sub> :	0,62
Temperatura:	20 °C

La determinación del nivel-altura (h) del producto en el depósito se determina a partir de la fórmula del segmento de un círculo de radio R



$$S = \frac{1}{2} R^2 (\theta - \text{sen } \theta) \quad (\theta \text{ en radianes})$$

$$\cos \varphi = \frac{R-h}{R} \quad \therefore \varphi = \arccos \frac{R-h}{R} \quad (\text{radianes})$$

$$\theta = 2\varphi = 2 \arccos \frac{R-h}{R}$$

$$S = \frac{1}{2} R^2 \left[ 2 \arccos \frac{R-h}{R} - \text{sen} \left( 2 \arccos \frac{R-h}{R} \right) \right] \quad (\text{m}^2)$$



$$\text{Volumen} = S \cdot \text{longitud del depósito} \quad (\text{m}^3)$$

en el que los 2005 m<sup>3</sup> corresponden a  $h = 12,65 \text{ m}$

Aplicando posteriormente la ecuación [4.11] se obtiene los siguientes valores anotados en la Tabla [4.7] y representados en la Gráfica 4.3.

Nivel (m)	Queroseno	Gasolinas	Gasóleo A	Gasóleo C	Fuel-Oil 1	Fuel-Oil 2
12,65	0	0	0	0	0	0
12,4	6918	6656	8275	8804	6890	8098
12,2	12548	12072	15010	15969	12497	14688
12,0	18262	17569	21844	23240	18187	21376
11,8	24057	23144	28776	30615	23959	28160
11,6	29934	28798	35806	38094	29812	35039
11,4	35890	34528	42931	45675	35744	42011
11,2	41926	40335	50150	53355	41755	49076
11,0	48039	46216	57463	61135	47844	56232
10,8	54229	52172	64867	69013	54009	63478
10,6	60496	58200	72363	76988	60250	70813
10,4	66837	64301	79948	85058	66565	78236
10,2	73252	70473	87622	93222	72954	85745
10,0	79741	76715	95383	101480	79417	93341
9,8	86303	83028	103232	109830	85951	101021
9,6	92936	89409	111166	118271	92557	108785
9,4	99639	95859	119185	126803	99234	116632
9,2	106414	102376	127288	135424	105981	124562
9,0	113257	108960	135474	144133	112796	132573
8,8	120170	115610	143742	152930	119681	140664
8,6	127150	122326	152092	161813	126633	148835
8,4	134198	129106	160523	170783	133652	157085
8,2	141313	135951	169033	179837	140738	165413
8,0	148494	142859	177623	188976	147890	173819
7,8	155740	149831	186291	198198	155107	182301
7,6	163052	156865	195036	207502	162388	190859
7,4	170428	163961	203859	216889	169734	199493
7,2	177868	171119	212758	226357	177144	208202
7,0	185371	178337	221733	235906	184617	216985
6,8	192937	185616	230783	245534	192152	225841
6,6	200565	192955	239908	255242	199749	234770
6,4	208255	200353	249106	265029	207407	243771
6,2	216006	207810	258378	274893	215127	252845
6,0	223818	215326	267723	284835	222907	261989

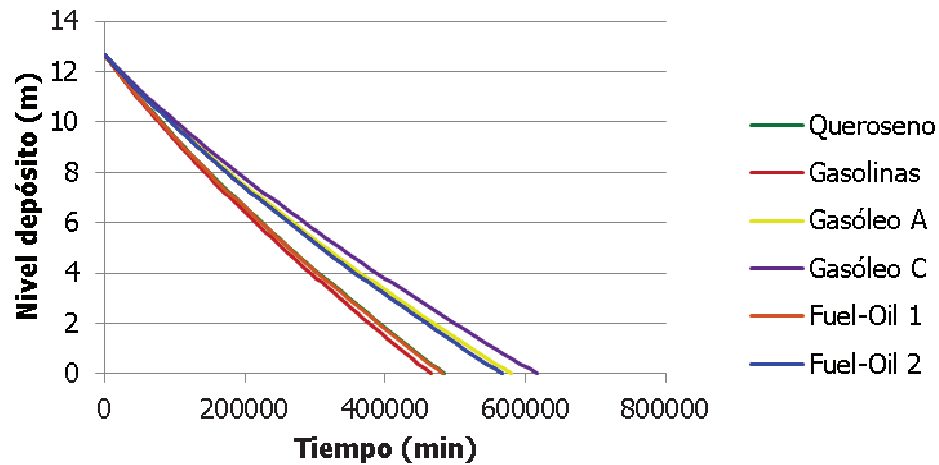


Nivel (m)	Queroseno	Gasolinas	Gasóleo A	Gasóleo C	Fuel-Oil 1	Fuel-Oil 2
5,8	231691	222899	277139	294853	230748	271204
5,6	239623	230530	286627	304948	238648	280489
5,4	247615	238219	296187	315118	246607	289843
5,2	255665	245964	305817	325363	254625	299267
5,0	263774	253765	315516	335683	262701	308759
4,8	271942	261623	325286	346077	270835	318319
4,6	280167	269536	335124	356544	279027	327947
4,4	288449	277504	345031	367085	287275	337642
4,2	296788	285527	355006	377697	295581	347404
4,0	305184	293604	365049	388382	303942	357231
3,8	313636	301735	375159	399138	312360	367125
3,6	322144	309920	385336	409965	320833	377083
3,4	330707	318158	395579	420863	329361	387107
3,2	339325	326450	405888	431831	337944	397195
3,0	347998	334794	416262	442868	346582	407347
2,8	356726	343190	426701	453975	355274	417563
2,6	365507	351638	437205	465150	364020	427842
2,4	374342	360138	447773	476394	372819	438184
2,2	383231	368689	458405	487705	381671	448588
2,0	392172	377291	469101	499085	390576	459055
1,8	401167	385944	479860	510531	399534	469583
1,6	410213	394648	490681	522044	408544	480172
1,4	419312	403402	501565	533623	417606	490823
1,2	428463	412205	512511	545269	426719	501534
1,0	437665	421058	523518	556980	435884	512306
0,8	446919	429961	534587	568756	445100	523138
0,6	456223	438912	545716	580597	454367	534029
0,4	465579	447912	556907	592503	463684	544980
0,2	474984	456961	568158	604473	473051	555990
0,0	484440	466059	579468	616506	482469	567058

Tabla 4.7. Tiempos de vaciado en (minutos)



## Tiempos de derrame



**Gráfica 4.3.** Variación del tiempo de vaciado de un depósito con el nivel de diferentes derivados del petróleo en un tanque cilíndrico horizontal.

El resultado de la simulación realizada mediante el modelo APPO se muestra en el Esquema 4.3.

**SAPPO**  
 Archivo Consultas Emergencias NTP Recursos ?

**GASOLINA AUTOMOCION 95** **Nº ONU: 1203** **FICHA DE SEGURIDAD**

**Clase de Depósito**  
 Cuadrado  Cilíndrico horizontal  Cilíndrico vertical  Esférico

Altura: 10 [metros]  
 Lado 1: [metros]  
 Lado 2: [metros]  
 Radio: 9,5 [metros]

**Condiciones del fluido**  
 Temperatura en el interior del depósito: 20 [°C]  
 Contenido:  masa [kg]  volumen 2005000 [litros]

**Orificio - características**  
 Coef. descarga Cd: 0,62  
 Diámetro orificio: 0,5 (cm)  
 Altura desde base: 0 ? (metros)

Tiempo que tarda en vaciarse el depósito: 7767 [hrs] 39 [min] 0 [seg] 466059 [min]

Litros derramados: 2005000

TIEMPO [minutos]	LITROS en tanque	LITROS derramados
0	2005000	0
51784	1666352	338648
103568	1353798	651202
155353	1067105	937895
207137	806761	1198239
258921	573965	1431035
310706	370810	1634190
362490	200841	1804159
414275	70692	1934308
466059	0	2005000

Gráfico: [Litros] vs [minutos]

Botones: CALCULAR, INFORME, OTRO CALCULO

**Esquema 4.3.** Pantalla de entrada y salida de datos de una simulación de un vertido de Gasolina de automoción de 95 octanos desde un tanque cilíndrico horizontal.



### Supuesto 4 – Depósito esférico

Características:

Depósito:	esférico
Diámetro:	17,5 m
Capacidad:	2806 m <sup>3</sup>
Contenido:	2043 m <sup>3</sup> de producto
Diámetro orificio:	0,005 m
Altura orificio:	0 m
C <sub>d</sub> :	0,62
Temperatura:	20 °C

Para el cálculo del nivel del fluido en el interior del tanque, basta con usar la fórmula establecida para el segmento esférico de una base:

$$V = \frac{\pi h^2}{3} (3R - h) \quad (\text{m}^3)$$

donde para un contenido de 2043 m<sup>3</sup> se obtiene un nivel de 11,5 m

Aplicando la fórmula [4.12] se obtiene la Tabla [4.8] que a continuación se indica.

Nivel (m)	Queroseno	Gasolinas	Gasóleo A	Gasóleo C	Fuel-Oil 1	Fuel-Oil 2
11,50	0	0	0	0	0	0
11,4	3497	3364	4183	4451	3483	4094
11,2	10618	10215	12700	13512	10574	12428
11,0	17902	17223	21414	22783	17830	20956
10,8	25347	24385	30319	32257	25244	29670
10,6	32946	31696	39409	41928	32812	38565
10,4	40696	39152	48679	51790	40530	47636
10,2	48590	46747	58122	61837	48393	56877
10,0	56625	54477	67733	72062	56395	66282
9,8	64795	62336	77505	82459	64531	75845
9,6	73095	70321	87433	93021	72797	85560



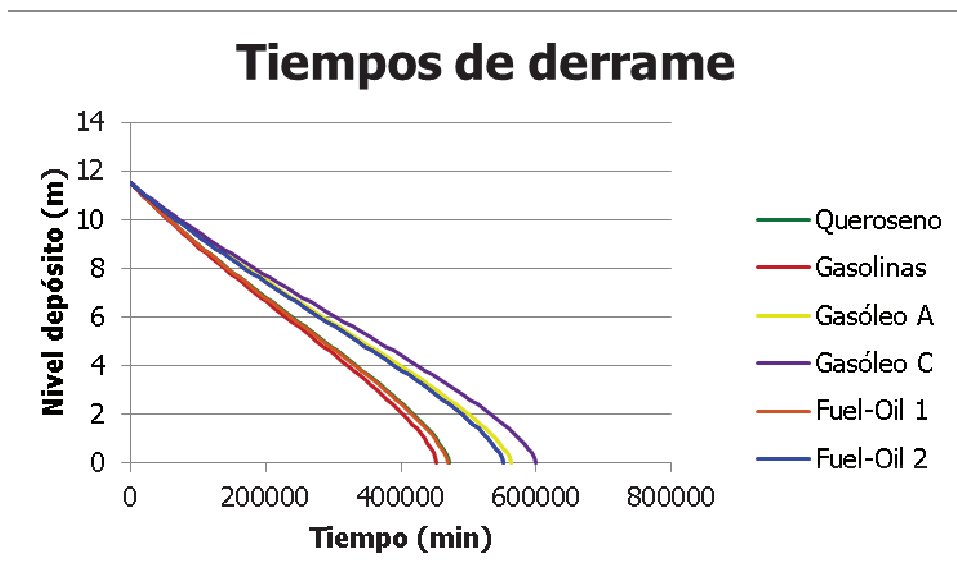
Nivel (m)	Queroseno	Gasolinas	Gasóleo A	Gasóleo C	Fuel-Oil 1	Fuel-Oil 2
9,4	81519	78426	97510	103742	81187	95421
9,2	90062	86645	107729	114615	89696	105422
9,0	98720	94974	118084	125632	98318	115556
8,8	107485	103407	128569	136787	107048	125816
8,6	116353	111938	139177	148073	115879	136196
8,4	125317	120562	149900	159481	124808	146690
8,2	134373	129274	160732	171005	133826	157289
8,0	143513	138067	171664	182637	142929	167988
7,8	152731	146936	182691	194368	152110	178779
7,6	162022	155874	193805	206192	161363	189654
7,4	171379	164876	204996	218099	170681	200606
7,2	180794	173934	216259	230081	180058	211627
7,0	190262	183042	227583	242130	189487	222709
6,8	199774	192194	238962	254236	198961	233844
6,6	209325	201382	250386	266390	208473	245024
6,4	218906	210600	261847	278584	218016	256239
6,2	228511	219840	273335	290806	227581	267482
6,0	238130	229094	284842	303048	237161	278741
5,8	247756	238355	296356	315299	246748	290009
5,6	257381	247615	307869	327547	256334	301276
5,4	266996	256865	319370	339783	265909	312530
5,2	276591	266096	330848	351995	275466	323762
5,0	286159	275300	342292	364170	284994	334961
4,8	295687	284468	353690	376296	294484	346115
4,6	305168	293588	365030	388361	303926	357212
4,4	314589	302652	376299	400351	313309	368240
4,2	323941	311649	387485	412252	322622	379187
4,0	333210	320567	398573	424049	331854	390037
3,8	342386	329394	409549	435726	340993	400778
3,6	351455	338119	420396	447267	350024	411393
3,4	360403	346727	431099	458654	358936	421867
3,2	369215	355205	441641	469869	367713	432182
3,0	377877	363538	452001	480892	376339	442321
2,8	386371	371710	462161	491701	384798	452263



Nivel (m)	Queroseno	Gasolinas	Gasóleo A	Gasóleo C	Fuel-Oil 1	Fuel-Oil 2
2,6	394678	379703	472099	502274	393072	461988
2,4	402781	387497	481790	512585	401142	471472
2,2	410656	395073	491210	522607	408984	480690
2,0	418279	402408	500329	532309	416577	489614
1,8	425625	409474	509115	541656	423893	498212
1,6	432661	416244	517533	550612	430901	506449
1,4	439355	422684	525539	559130	437567	514284
1,2	445663	428753	533085	567158	443850	521668
1,0	451538	434404	540111	574634	449700	528544
0,8	456915	439577	546543	581477	455055	534838
0,6	461712	444193	552282	587582	459833	540454
0,4	465811	448133	557185	592799	463916	545252
0,2	469014	451212	561016	596874	467105	549001
0,0	470784	452888	563134	599127	468868	551073

Tabla 4.8. Tiempos de vaciado en (minutos)

Su representación se muestra en la Gráfica 4.4.



Gráfica 4.4. Variación del tiempo de vaciado de un depósito con el nivel de diferentes derivados del petróleo en un tanque esférico.



La pantalla de entrada y salida de datos de la simulación realizada mediante el modelo APPO se muestra en el Esquema 4.4.

**GASOLINA AUTOMOCION 95**      **Nº ONU: 1203**      **FICHA DE SEGURIDAD**

**Clase de Depósito:**  
 Cuadrado       Cilíndrico horizontal       Cilíndrico vertical       Esférico

Altura: [ ] [metros]  
 Lado 1: [ ] [metros]  
 Lado 2: [ ] [metros]  
 Radio: 8,75 [metros]

**Condiciones del fluido:**  
 Temperatura en el interior del depósito: 20 [°C]  
 Contenido:  masa [kg]       volumen 2043000 [litros]

**Orificio - características:**  
 Coef. descarga  $C_d$ : 0,62  
 Diámetro orificio: 0,5 (cm)  
 Altura desde base: 0 [metros]

Tiempo que tarda en vaciarse el depósito: 7548 [hrs] 8 [min] 0 [seg] 452888 [min]

Litros derramados: 2043000

**TIEMPO [minutos]      LITROS en tanque      LITROS derramados**

TIEMPO [minutos]	LITROS en tanque	LITROS derramados
0	2043000	0
50320	1727265	315735
100641	1430965	612035
150962	1154146	888854
201283	896961	1146039
251604	660252	1382748
301925	445994	1597006
352246	257328	1785672
402567	101141	1941859
452888	0	2043000

**OTRO CALCULO**

**Esquema 4.4.** Pantalla de entrada y salida de datos de una simulación de un vertido de Gasolina de automoción de 95 octanos desde un tanque esférico.

### Supuesto 5 – Influencia del coeficiente $C_d$

Dado que todas las fórmulas de vaciado de depósitos vistas en este capítulo, corresponden a un mismo modelo:

$$t = \frac{1}{C_d} f(\rho, \mu, h, \text{medidas del depósito y orificio})$$

basta con realizar, a efectos de demostración, cálculos para un tipo de tanque:



Depósito: rectangular fondo plano  
Producto: gasolinas  
Dimensiones: 20 x 20 x 7 m  
Capacidad: 2800 m<sup>3</sup>  
Contenido: 2000 m<sup>3</sup> de producto:  $20 \cdot 20 \cdot h = 2000 \rightarrow h = 5 \text{ m}$   
Diámetro orificio: 0,005 m  
Altura orificio: 0 m  
 $C_d$ : 0,5 - 0,62 - 0,82 - 0,94 - 1  
Temperatura: 20 °C

La Tabla 4.9 muestra los tiempos de vaciado para diferentes niveles de llenado y valores de  $C_d$ .

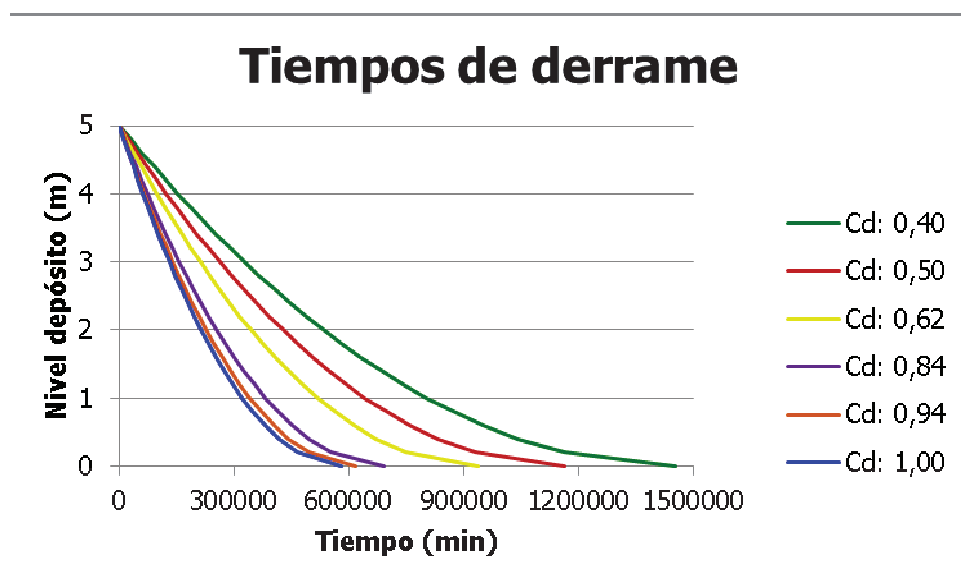
Nivel (m)	$C_d$ : 0,4	$C_d$ : 0,5	$C_d$ : 0,62	$C_d$ : 0,84	$C_d$ : 0,94	$C_d$ :1
5,0	0	0	0	0	0	0
4,8	29321	23457	18917	13962	12477	11728
4,6	59259	47407	38232	28219	25217	23704
4,4	89856	71885	57972	42789	38237	35942
4,2	121156	96925	78165	57693	51556	48462
4,0	153211	122569	98846	72958	65196	61284
3,8	186078	148862	120050	88608	79182	74431
3,6	219821	175857	141820	104677	93541	87928
3,4	254516	203613	164204	121198	108305	101806
3,2	290247	232198	187256	138213	123509	116099
3,0	327113	261691	211041	155768	139197	130845
2,8	365230	292184	235632	173919	155417	146092
2,6	404734	323788	261119	192731	172227	161894
2,4	445790	356632	287606	212281	189698	178316
2,2	488594	390876	315222	232664	207913	195438
2,0	533393	426715	344125	253997	226976	213357
1,8	580494	464395	374512	276426	247019	232198
1,6	630292	504234	406640	300139	268210	252117
1,4	683313	546651	440847	325387	290772	273325
1,2	740278	592222	477599	352513	315012	296111



Nivel (m)	$C_d: 0,4$	$C_d: 0,5$	$C_d: 0,62$	$C_d: 0,84$	$C_d: 0,94$	$C_d: 1$
1,0	802223	641778	517563	382011	341371	320889
0,8	870741	696593	561768	414638	370528	348296
0,6	948512	758810	611943	451672	403622	379405
0,4	1040764	832611	671460	495602	442878	416305
0,2	1160988	928790	749024	552851	494037	464395
0,0	1451235	1160988	936280	691064	617547	580494

Tabla 4.8 Tiempos de vaciado en (minutos)

La variación del tiempo de vaciado, en función del nivel del líquido, para diferentes niveles y coeficientes de descarga se muestran en la Gráfica 4.5.



**Gráfica 4.5.** Variación del tiempo de vaciado, en función del nivel del líquido, para diferentes niveles y coeficientes de descarga.





**Derrame de gases  
procedentes de tanques  
presurizados.**

CAPITULO

**5**



## 5.1 Introducción

La industria Química y Petroquímica es un sector (con un importante papel en la economía mundial) que está en continuo desarrollo, incorporando cada vez más nuevas tecnologías tendentes a una mejora de los ratios de producción, a minimizar el impacto medio-ambiental de sus emisiones, y a reducir la siniestrabilidad laboral.

Los gases, como cualquier otro estado agregado de la materia, forman parte de las materias primas básicas del sector industrial, y de entre sus muchas aplicaciones en la industria, se pueden destacar las siguientes:

- **Inertizado y *Blanketing*.** Técnica de protección que no tiene relación directa con los procesos de fabricación, sino con la seguridad de las instalaciones y la calidad de los productos (protección de depósitos y reactores, sobrepresión de nitrógeno en equipos, protección de fibras sintéticas a la salida de la extrusora, transporte de productos elaborados en atmósfera inerte, etc.).
- **Purgas.** Trabajar con productos sensibles, hace necesario en determinados momentos del proceso el realizar purgas que permitan garantizar las condiciones esenciales del productos (seguridad, economía y calidad).

- **Recuperación de compuestos orgánicos volátiles.** Además de las exigencias medio-ambientales, resulta interesante el poder recuperar los compuestos orgánicos volátiles utilizados (pinturas, tintas, resinas, disolventes, etc.) mediante algún proceso simple y fiable. La recuperación por vía criogénica (utilizando el poder frigorífico del nitrógeno líquido) permite el licuado y la recuperación del producto.
- **Regulación de temperatura y reacciones a muy baja temperatura.** Muchas operaciones químicas deben llevarse a cabo a una temperatura determinada. En estos casos, el nitrógeno líquido es el medio más utilizado.
- **Tratamiento de aguas.** Todos los procesos biológicos aplicados a depurar aguas requieren oxígeno. El interés en reducir los parámetros de vertido de las aguas residuales de las industrias, ha favorecido la utilización de gas oxígeno en las depuradoras.
- **Limpieza de superficies.** El método CLEANBLAST utilizado para la limpieza de superficies que tienen restos de adhesivos, desmoldeantes, etc. se basa en la proyección de partículas de hielo seco a alta velocidad, lo cual permite un resultado óptimo sin deterioro de las superficies tratadas y sin usar disolventes agresivos para el medio-ambiente.

La Tabla 5.1 muestra la aplicación de gases en la industria alimentaria.

	Envasado	Carbonatación	Refrigeración	Congelación	Inertizado	Maduración	Hidrogenación	Sulfitado	Trat. Aguas	Fertilización
<b>Cárnica / Avícola</b>	√		√	√					√	
<b>Láctea / Helados</b>	√		√	√					√	
<b>Pescado / Marisco</b>	√		√	√				√	√	
<b>Vegetales / Frutas</b>	√		√	√		√			√	
<b>Prod. Secos</b>	√		√	√					√	
<b>Cocinados / Conservas</b>	√		√	√					√	
<b>Panadería / Bollería</b>	√		√	√					√	
<b>Grasas / Aceites</b>					√		√		√	
<b>Cerveza / Refrescos</b>		√							√	
<b>Vinícola / Zumos</b>		√	√	√	√			√	√	
<b>Agricultura</b>									√	√

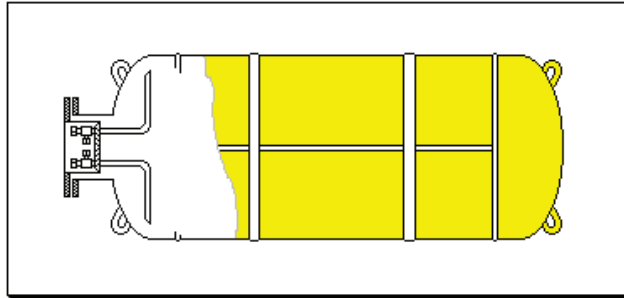
Tabla 5.1. Aplicación de gases en la industria alimentaria  
(Fuente: Carburos Metálicos)

El sector alimentario en las Islas Baleares, es uno de los que usa una considerable diversidad de gases en sus procesos (Tabla 5.1). No obstante, el consumo y su aplicación es muy pequeña en comparación con otras comunidades de la geografía española.

La utilización y almacenamiento de gases en Baleares se hace patente con el uso que de ellos se hace:

- gases para uso **doméstico** (butano, propano, gas ciudad, etc.)
- gases **industriales** (por ejemplo anhídrido carbónico en la industria de bebidas refrescantes, cloro en la desinfección de aguas -Figura 5.1-, propano para calderas, nitrógeno para el envasado de alimentos en atmósfera inerte, etc.)
- gases **medicinales** (el oxígeno es el más distribuido de todos ellos; prácticamente todos los hospitales y clínicas tienen un depósito destinado a su almacenamiento)

- gases para sectores **específicos** (soldadura, etc.)
- gases para **análisis** (donde se encuadran los usados en cromatografía gaseosa, espectroscopía de absorción atómica, etc.)



**Figura 5.1.** Contenedor para cloro de fondos convexos.

Atendiendo a su estado físico en el envase, dichos compuestos se pueden clasificar en los siguientes tipos:

- **Gases comprimidos:** cualquier gas o mezcla de gases cuya temperatura crítica es menor o igual a  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  y que está envasado a alta presión.
- **Gases licuados:** cualquier gas o mezcla de gases cuya temperatura crítica es mayor o igual a  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- **Gases refrigerados o criogénicos:** su temperatura de ebullición a presión atmosférica es inferior a  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- **Gases disueltos:** el gas se encuentra, por razones de seguridad, disuelto en un líquido. Prácticamente el único gas disuelto que se comercializa en estas condiciones es el acetileno.

## 5.2 Riesgos principales de los gases y los GLP

Los riesgos que los gases suponen para el sector son de sobra conocidos por el industrial; no obstante, para una valoración sistemática de los mismos, resulta útil el distinguir entre los riesgos que presentan los gases confinados en un recipiente y los riesgos que presentan los escapes de gas de un recipiente, aunque los dos puedan tener lugar simultáneamente en un solo incidente.

El calentamiento afecta de forma distinta a los gases comprimidos y a los gases licuados. Un gas comprimido (sólo en estado gaseoso) tiende siempre a expandirse, siguiendo las leyes clásicas del comportamiento de los gases ideales (Boyle-Mariotte y Gay-Lussac).

Los gases licuados, incluyendo los criogénicos (que están parcialmente en estado líquido), tienen un comportamiento bastante más complicado, puesto que el resultado de un calentamiento corresponde a la combinación de tres efectos:

- 1.** La fase gaseosa está sujeta a los mismos efectos que los gases comprimidos
- 2.** El líquido tiende a dilatarse comprimiendo más el vapor
- 3.** La presión del vapor del líquido aumenta al aumentar la temperatura de este pudiendo producir un aumento de presión mucho más grande de la esperada si la dilatación del líquido hace que el recipiente quede totalmente lleno de líquido (condensación de la fase gaseosa); si esto sucede, cualquier pequeña

cantidad de calor adicional producirá un aumento enorme de la presión con la consecuente rotura del recipiente que lo contiene.

Otro fenómeno menos frecuente pero no menos importante es el de la rotura del recipiente por un exceso de presión provocado por la combustión del gas en el interior. Muy rara vez se usa una mezcla envasada de oxígeno o aire con otro gas, pero podría producirse accidentalmente. La mayor parte de estas explosiones tienen lugar durante la aplicación industrial o médica de los gases, puesto que en este tipo de actividades se emplea frecuentemente aire u oxígeno comprimido en combinación con otros gases inflamables. Siempre que la posibilidad de esta mezcla sea inherente al proceso mismo, por ejemplo en los sistemas de corte por oxígeno y gas combustible, se toman medidas para impedir que se produzca en el interior de los recipientes. En términos más generales, este tipo de accidentes puede impedirse solamente mediante la instrucción y el adiestramiento del personal en los procedimientos adecuados de llenado de los recipientes.

Los gases que se escapan de su recipiente, presentan riesgos que varían según las propiedades químicas, físicas y de la naturaleza del medio ambiente en que escapan (véanse a modo de ejemplo las propiedades de combustión de los gases inflamables expuestos en Tabla 5.2). Todos los gases, con la excepción del oxígeno y del aire, presentan un cierto riesgo para las personas, al desplazar el aire necesario para la respiración. Los gases inertes, incoloros e inodoros como el nitrógeno, helio, argón, etc. son especialmente peligrosos, ya que no se advierte su presencia. La concentración mínima de oxígeno en el aire para la supervivencia humana oscila entre 6 y 10 % en volumen.

Los problemas que pueden originar los gases al derramarse son los siguientes:

- Gases tóxicos o venenosos: son especialmente peligrosos cuando se desprenden en el transcurso de un incendio pues impiden y/o retrasan el acceso de los equipos de intervención al lugar del siniestro.



- Oxígeno y gases oxidantes: aunque no son inflamables, hacen que otras materias entren en ignición a temperaturas más bajas.
- Gases licuados: si se escapan en forma de líquido pueden causar congelaciones graves.
- Gases inflamables: presentan dos clases de riesgos fundamentales: explosiones por combustión e incendios.

Un caso muy concreto de gas es el de los llamados gases licuados del petróleo (GLP): mezcla de hidrocarburos de petróleo los cuales son gaseosos a temperaturas y presiones ambientales normales. Dicha mezcla de gases puede ser licuada aplicándole una presión moderada, llegando a una forma líquida 250 veces más densa que su forma gaseosa.

Su composición es marcadamente diferente dependiendo de su procedencia, aunque el GLP comercial está compuesto por una mezcla de propano y butano, acompañada de etanos y pentanos. Para el uso estándar de calefacción y para propósitos de uso doméstico, es indispensable una mezcla de propano y butano; el propano comienza a evaporarse por encima de los  $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$  mientras que el butano (12 % más pesado que el propano) a  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , hecho que justifica el uso de la mezcla en ambientes fríos donde el butano solo, tendría problemas de evaporación.

El valor calorífico de los GLP por unidad de masa es más alto que el de la gasolina o gas-oil. Sin embargo, debido a su baja densidad (casi dos veces más baja que el agua) en base al volumen tiene un valor calorífico menor, lo cual es una desventaja.

En lo que a utilización, distribución y comercialización se refiere, en España hasta el año 1.992 el control de los GLP consistió en un régimen llamado de *monopolio legal*.

Así, la fijación de los precios máximos de venta al público por la Administración, favoreció a determinadas empresas, que trabajaron en condiciones óptimas de rentabilidad.

La liberalización del precio del gas para cargas inferiores a 8 kg, en 1.998, y la liberalización del canal de ventas, también en ese mismo año, marcó la desaparición del monopolio, y permitió una entrada contundente de empresas que también comercializan los GLP.

En la Isla de Mallorca, el consumo de GLP y similares se reduce a:

- Bombonas de butano para uso doméstico (cocinas, calentadores y estufas)
- Gas propano, utilizado por pequeñas empresas, restaurantes, y comunidades de vecinos
- Gas ciudad y aire propanado, suministrado por la compañía GESA a la ciudad de Palma y sus alrededores.
- Gas natural, suministrado por gaseoducto.

El que más polémica ha suscitado es sin duda el Gas Ciudad, el cual se fabricaba y distribuía en la ciudad de Palma por la compañía GESA (grupo ENDESA) desde su factoría sita en el Polígono de Levante. A partir de la Nafta, mezcla de hidrocarburos que llegaba a la isla a través de buques petroleros, se fabricaba el gas ciudad.

Con el cambio de Gas Ciudad a aire propanado (como puente para introducir el Gas Natural), todo el sistema de fabricación se ha modificado, y se está estudiando por parte de la compañía la posibilidad de traer dicho gas en buques acondicionados y realizar las operaciones de descarga en un dique acondicionado para tal efecto, lo cual ha generado un serio estado de inquietud al ciudadano, y como no, a grupos ecologistas y ciertos partidos políticos.

En la Tabla 5.2 se muestran las propiedades de los diferentes gases:

<b>GAS</b>	<b>MJ/m<sup>3</sup></b> (en bruto)	<b>LII</b> (% vo.l)	<b>LSI</b> (% vol.)	<b>Densidad relativa</b>	<b>T. Ignición</b> (°C)
Gas natural (alta inercia)	35,7-39,2	4,5	14,0	0,660-0,708	--
Gas natural (alto contenido metano)	37,6-39,9	4,7	15,0	0,590-0,614	482-632
Gas natural (alto poder calorífico)	39,9-41,9	4,7	14,5	0,620-0,719	--
Gas de alto horno	3,0-4,1	33,2	71,3	1,04-1,00	--
Gas de horno de cok	21,4	4,4	34,0	0,38	--
Propano (comercial)	93,7	2,15	9,6	1,52	493-604
Butano (comercial)	122,9	1,9	8,5	2,0	482-538
Gases cloacales	24,9	6,0	17,0	0,79	--
Acetileno	208,1	2,5	81,0	0,91	305
Hidrógeno	12,1	4,0	75,0	0,07	500
Amoníaco anhidro	14,4	16,0	25,0	0,60	651
Monóxido de carbono	11,7	12,5	74,0	0,97	609
Etileno	59,6	2,7	36,0	0,98	490

Tabla 5.2. Propiedades de combustión de los gases inflamables más comunes usados en la industria.



### 5.3 Flujo compresible de gases

Cuando las variaciones de densidad de un fluido son pequeñas y su velocidad no demasiado alta (número de Mach,  $Ma < 0,3$ ), entonces el balance de energía mecánica se reduce a las fórmulas descritas anteriormente en el tema 4. Dichas ecuaciones representan el flujo de todos los líquidos y de los gases que circulan relativamente despacio. Se le denomina *flujo incompresible*.

Sólo para gases, cuando la razón de presiones es grande y/o el flujo muy rápido, entonces los efectos de la energía cinética y de la compresibilidad (variaciones de la densidad) pueden llegar a ser los términos dominantes en el balance de energía mecánica. En tal situación, el balance de energía mecánica toma formas bastante diferentes a las desarrolladas en el capítulo anterior. Se le denomina *flujo compresible de gases*, y sus dos factores determinantes (compresibilidad y velocidad) están relacionados por el número de Mach ( $Ma$ ):

$$Ma = \frac{\text{velocidad del gas}}{\text{velocidad del sonido en el gas}} = \frac{u}{c}$$

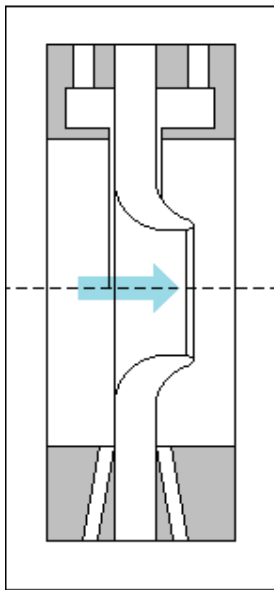
donde la velocidad del sonido, en gases ideales, viene determinada por la Termodinámica clásica (Levenspiel 1993) como:

$$c = \left[ \frac{\gamma P}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[ \frac{\gamma R T}{(PM)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad [5.1]$$

siendo  $\gamma$  el cociente entre  $C_p$  y  $C_v$  del gas.

## 5.4 Flujo adiabático a través de una boquilla

Si se supone que el gas contenido en un tanque fluye en régimen adiabático y sin fricción (un orificio es una región tan pequeña en la que se puede suponer razonablemente que la pérdida friccional es despreciable), del estadio 0 (interior del tanque) al estadio 1 (exterior del tanque) a través de un orificio liso y redondeado llamado boquilla (Figura 5.2), el balance de energía queda reducido a la expresión [5.2] teniendo en cuenta que los factores de trabajo, energía potencial y pérdida friccional son despreciables.



**Figura 5.2.** Boquilla de salida de un gas.

Dado que en estos casos la pérdida de presión en el sistema provoca una variación en la densidad del gas (teóricamente adiabática y reversiblemente) superior al 10 por ciento (flujo compresible), resulta cómodo el operar con la densidad promedio y tratar al gas como un gas ideal incompresible que fluye en flujo adiabático.

Considerando además, que el flujo a través de la boquilla es turbulento ( $\alpha_1=1$ ) y que se cumplen las condiciones de una expansión adiabática, la ecuación [5.2] queda transformada en:

$$\frac{u_1^2}{2\alpha_1} + \int v dP = 0 \quad [5.2]$$

$$\left( \frac{u_1^2}{2\alpha_1} - \frac{u_0^1}{2\alpha_0} \right) + g(z_1 - z_0) + \int \frac{dP}{\rho} + \Sigma F = W_s$$

$$\frac{u_1^2}{2} + \int \left( \frac{P_0 v_0^\gamma}{P} \right)^{\frac{1}{\gamma}} dP = \frac{\theta}{\rho} = \frac{1}{v} = \frac{P(PM)}{RT} \quad [5.3]$$



## 5.5 Vaciado de un depósito

### Velocidad de vaciado $u_1$

La velocidad de vaciado de un depósito, la cual depende en estos casos de  $\Delta P$  ( $\Delta P = P_1 - P_0$ ), se obtiene aplicando la ecuación [5.3] al sistema en concreto. Así, considerando  $P_0$  como la presión inicial en el interior del tanque, y  $P_1$  como la presión en el exterior (en la mayoría de los casos la presión atmosférica  $P_{atm}$ ):

$$\frac{u_1^2}{2} + (P_0 v_0^\gamma)^{\frac{1}{\gamma}} \int_{P_0}^{P_1} \frac{dP}{P^\gamma} = 0$$

que una vez integrada resulta:

$$u_1^2 = \frac{2\gamma v_0 P_0}{\gamma - 1} \left[ 1 - \left( \frac{P_{atm}}{P_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \quad [5.4]$$

en la que:  $u_1$ : velocidad de salida del gas (m/s)  
 $v_0$ : volumen másico inicial en el interior del tanque (m<sup>3</sup>/kg)  
 $P_0$ : presión inicial en el interior del tanque (Pa)  
 $P_{atm}$ : presión en el exterior (Pa)  
 $\gamma$ : relación  $C_p/C_v$  del gas

### Velocidad másica G

La velocidad másica (G) (masa por unidad de superficie y tiempo) se obtiene dividiendo la velocidad de vaciado por el volumen, aplicándole a este último la relación de expansiones adiabáticas. Sustituyendo en la relación la velocidad  $u_1$  por la expresión [5.4], queda:

$$G = \frac{u_1}{v_1} = \frac{u_1}{\sqrt{\left(\frac{P_0}{P_{atm}}\right)^{\frac{2}{\gamma}} v_0^2}} = \sqrt{2 \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P_0}{v_0} \left(\frac{P_{atm}}{P_0}\right)^{\frac{2}{\gamma}} \left[1 - \left(\frac{P_{atm}}{P_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]} \quad [5.5]$$

donde:  $G$ : velocidad másica (kg/m<sup>2</sup>·s)  
 $u_1$ : velocidad de salida del gas (m/s)  
 $v_0$ : volumen másico inicial en el interior del tanque (m<sup>3</sup>/kg)  
 $P_0$ : presión inicial en el interior del tanque (Pa)  
 $P_{atm}$ : presión en el exterior (Pa)  
 $\gamma$ : relación  $C_p/C_v$  del gas

### Caudal másico $Q_M$

Por otro lado, el caudal másico  $Q_M$  (masa por unidad de tiempo) resulta de multiplicar la velocidad másica G por la superficie del orificio de salida del gas  $A_{orif}$ .

$$Q_M = A_{\text{orif}} \sqrt{2 \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P_0}{v_0} \left( \frac{P_{\text{atm}}}{P_0} \right)^{\frac{2}{\gamma}} \left[ 1 - \left( \frac{P_{\text{atm}}}{P_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]}$$

$$Q_M = A_{\text{orif}} \sqrt{\rho_0 P_0 \gamma \frac{2}{\gamma-1} \left[ \left( \frac{P_{\text{atm}}}{P_0} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left( \frac{P_{\text{atm}}}{P_0} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \quad [5.6]$$

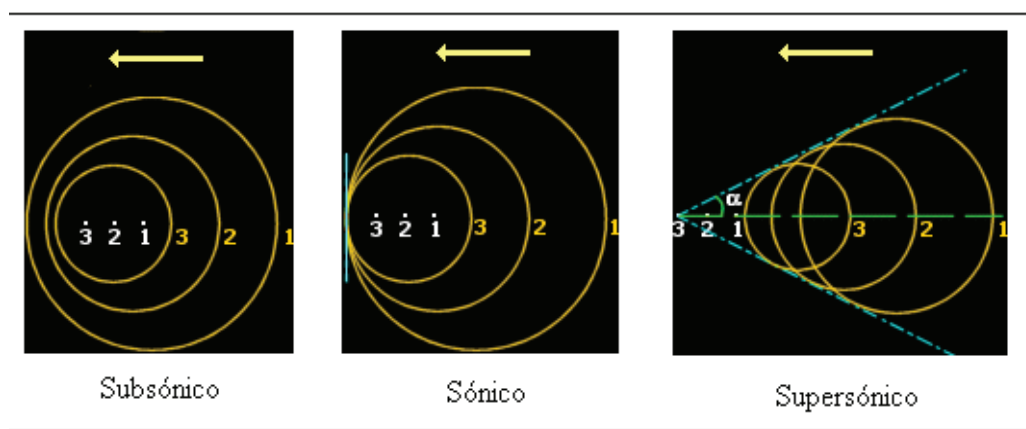
en el que:  $Q_M$ : caudal másico (kg/s)  
 $A_{\text{orif}}$ : área del orificio (m<sup>2</sup>)  
 $\rho_0$ : densidad inicial del gas en el interior del tanque (kg/m<sup>3</sup>)



## 5.6 El número de Mach

El número de Mach es un parámetro adimensional de gran utilidad en el estudio de la mecánica de fluidos ya que da a conocer la importancia de los factores de compresibilidad y de velocidad, cuales son las condiciones del flujo, y lógicamente permite evaluar la velocidad del mismo respecto a la velocidad del sonido (340 m/s a 20 °C y 1 atm. de presión).

Atendiendo a su valor, se pueden distinguir tres tipos diferentes de flujo en el sistema, tal como se muestra en la Figura 5.3:



**Figura 5.3.** Evolución de las ondas para diferentes flujos: subsónico, sónico y supersónico.

### **Flujo subsónico (compresible)**

Se da cuando el número de Mach es inferior a 1. Un caso muy particular se da cuando el valor de  $Ma = 0$ , lo cual induce a pensar que la velocidad del fluido (gas) es nula, o por el contrario que la velocidad del sonido en el fluido es infinita.

Estos casos ( $Ma < 1$ ) se pueden comparar con los de un cuerpo u objeto que se mueve a una velocidad inferior a la del sonido. En tal circunstancia, en la que el sonido va a una velocidad superior a la del objeto, perturba toda la zona que le precede.

En la Figura 5.3, los puntos blancos indican la posición del objeto mientras que los círculos amarillos indican la distorsión provocada por el cuerpo.

### **Flujo sónico (obstruido)**

Se da cuando el número de Mach es igual a 1 ( $Ma = 1$ ). En este caso, todas las ondas emitidas por el objeto o cuerpo son tangentes en un único punto (ver la Figura 5.3).

### **Flujo supersónico**

A velocidad supersónica, el objeto que avanza, no distorsiona el fluido que se encuentra delante. En este tipo de flujo ( $Ma > 1$ ), el cuerpo móvil siempre se encuentra por delante de la distorsión que provoca (Figura 5.3).

Las ondas emitidas son todas tangentes a dos planos que forman un ángulo  $\alpha$  (ángulo de Mach) cuyo valor disminuye conforme mayor es la velocidad del objeto.

## 5.7 Velocidad en función del número de Mach

Ante tales hechos, resulta de gran ayuda en determinados casos el expresar las ecuaciones de la velocidad  $u_1$ , velocidad másica  $G$  y caudal másico  $Q_M$  en función de dicho número.

Partiendo de la definición del número de Mach y de la razón de temperaturas en una expansión adiabática, la velocidad  $u_1$  queda representada por la siguiente ecuación:

$$u_1 = Ma_1 c_1 = Ma_1 \left[ \frac{\gamma R T_1}{(PM)} \right]^{\frac{1}{2}} = Ma_1 \sqrt{\frac{\gamma R T_0}{(PM) \left( \frac{P_0}{P_{atm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}} \quad [5.7]$$

Aplicando las definiciones vistas en el punto 5.5 de velocidad másica  $G$  y de caudal másico  $Q_M$ , resulta:

$$G = \frac{u_1}{v_1} = \frac{Ma_1 \sqrt{\frac{\gamma R T_0}{(PM) \left(\frac{P_0}{P_{atm}}\right)^\gamma}}}{\sqrt{\left(\frac{P_0}{P_{atm}}\right)^\frac{2}{\gamma}} v_0^2} = P_0 Ma_1 \sqrt{\frac{\gamma(PM)}{R T_0} \frac{1}{\left(\frac{P_0}{P_{atm}}\right)^\frac{\gamma+1}{\gamma}}} \quad [5.8]$$

$$Q_M = A_{orif} G = A_{orif} P_0 Ma_1 \sqrt{\frac{\gamma(PM)}{R T_0} \frac{1}{\left(\frac{P_0}{P_{atm}}\right)^\frac{\gamma+1}{\gamma}}} \quad [5.9]$$

en las que: R: constante de los gases ideales 8314 (J/K·mol)  
 T<sub>0</sub>: temperatura inicial en el interior del tanque (K)



## 5.8 Flujo obstruido

En la mayoría de los casos donde la presión exterior  $P_1$  coincide con la presión atmosférica, la velocidad de vaciado del depósito, depende de la presión en el interior del tanque  $P_0$  ( $\Delta P = P_{\text{atm}} - P_0$ ). Así pues, cuanto mayor sea este valor  $P_0$ , mayor será la velocidad de vaciado  $u_1$

No obstante, la termodinámica demuestra (Costa, E. 1985) y la experiencia lo confirma, que llega un punto en el que por muy grande que sea el valor de  $P_0$ , la velocidad de vaciado  $u_1$  se mantiene constante (no el caudal másico pues depende de la densidad del gas en el interior del depósito). Este fenómeno se da cuando el valor del número de Mach vale la unidad. Se ha llegado pues al máximo caudal posible de vaciado del depósito.

Para caracterizar este flujo, resulta más cómodo el utilizar las ecuaciones de la velocidad, etc. en función del número de Mach (donde su valor será  $Ma_1 = 1$ ).



### 5.9 Presión $P_0^*$ a la que el flujo es obstruido

Dado que la velocidad de salida del gas depende de la presión interior del tanque, resulta primordial el conocer esta presión ( $P_0$ ), y a partir de qué valor ( $P_0^*$ ) el flujo será obstruido.

Para ello, basta con partir de la definición del número de Ma y asignarle el valor de la unidad (flujo obstruido).

$$\text{Ma} = 1 = \left[ \frac{2}{\gamma - 1} \left[ \left( \frac{P_0^*}{P_{\text{atm}}} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right] \right] \quad \therefore \quad \frac{P_0^*}{P_{\text{atm}}} = \left( \frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

consecuentemente el flujo será obstruido para presiones superiores a  $P_0^*$

$$P_0^* = P_{\text{atm}} \left( \frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad [5.10]$$



### 5.10 Vaciado de depósitos en flujo obstruido: $u_1^*$ , $G^*$ , $Q_M^*$

Partiendo de la definición del número de Mach:

$$u_1^* = Ma_1 c_1 = 1 \left[ \frac{\gamma R T_0^*}{(PM) \left( \frac{P_0^*}{P_{atm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[ \frac{\gamma R T_0^*}{(PM) \left[ \left( \frac{\gamma+1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \right]^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

y operando igual que en el apartado 5.7, se obtienen las siguientes expresiones:

$$u_1^* = \left[ \frac{2 \gamma R T_0^*}{(PM)(\gamma+1)} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[ \frac{2 \gamma P_0^*}{\gamma+1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad [5.11]$$

$$G^* = P_0^* 1 \sqrt{\frac{\gamma(PM)}{R T_0^*} \frac{1}{\left( \frac{P_0^*}{P_{atm}} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}}}} = P_0^* \sqrt{\frac{\gamma}{\frac{R T_0^*}{(PM) \left[ \left( \frac{\gamma+1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \right]^{\frac{\gamma+1}{\gamma}}}}} = P_0^* \sqrt{\frac{(PM) \gamma \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}{R T_0^*}} \quad [5.12]$$

$$Q_M^* = A_{\text{orif}} G^* = A_{\text{orif}} P_0^* \sqrt{\frac{(PM)\gamma}{RT_0^*} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad [5.13]$$

### 5.11 Tiempo de derrame

El evaluar el tiempo que tardará en vaciarse o despresurizarse un depósito resulta sencillo si se conocen las siguientes variables del sistema:

- Presión inicial en el interior del tanque
- Volumen del tanque
- Temperatura del gas en el interior del tanque

Si el gas tiene un comportamiento de *gas ideal*, resulta muy sencillo calcular la masa del gas, y conociendo esta y el caudal másico  $Q_M$ , es inmediato evaluar el tiempo de vaciado.

$$n = \frac{P V}{R T} \quad \therefore \quad \text{masa} = n (PM) = \frac{P V}{R T} (PM)$$

donde  $Q_M$  se determinará usando las ecuaciones [5.6] o [5.13] dependiendo de que el flujo sea compresible u obstruido.

$$t_{\text{vaciado}} = \frac{\text{masa}}{Q_M} = \frac{P V (PM)}{R T Q_M} \quad [5.14]$$

donde:

- $t_{\text{vaciado}}$ : tiempo de vaciado (s)
- $Q_M$ : caudal másico (kg/s)
- P: presión (Pa)
- V: volumen ( $\text{m}^3$ )
- R: constante de los gases ideales 8,314 (J/K·mol)
- T: temperatura (K)
- (PM): masa molecular del gas



## 5.12 Cambio de temperatura en un derrame con flujo obstruido

En base a los estudios realizados por Ashdk Kumar y Sumant Vashisth (1999), el cambio de temperatura que experimenta un gas cuando es "derramado", se calcula suponiendo que el proceso se desarrolla en las dos siguientes fases:

1. el derrame se produce bajo condiciones de flujo obstruido (cambio de temperatura adiabático y reversible)
2. el proceso se encuentra entre las condiciones de flujo obstruido y las condiciones de presión ambiente

La fórmula [5.15] propuesta por estos autores para estimar el cambio de temperatura en el derrame ( $T_{\text{der}}$ ), se basa en la ecuación de Clausius-Clapeyron.

$$T_{\text{der}} = T_0 \left[ 1 - 0,85 \left( \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right) \right] \quad [5.15]$$

en la que:  $T_{\text{der}}$ : temperatura del gas después del derrame (K)  
 $T_0$ : temperatura del gas en el interior del tanque (K)  
 $\gamma$ : relación  $C_p/C_v$  del gas



### 5.13 NTP 385: Fugas en recipientes – emisión en fase gaseosa

Las expansiones de gas o vapor que tienen lugar en las situaciones de emisión son normalmente de uno de los dos tipos siguientes:

- expansión con estrangulamiento, la cual ocurre cuando el gas sale a través de una abertura o grieta muy estrecha
- expansión libre, cuando la grieta es mucho mayor

En su estudio, se comprueba que el caudal de emisión del gas (caracterizado por su peso molecular y su razón de capacidades caloríficas  $\gamma$ ) contenido en un recipiente a presión que sale por un orificio de características determinadas se mantiene constante mientras la razón de presiones  $p(\text{int})/p(\text{atm})$  cumple con lo establecido en [5.10]. Cuando dicha relación es inferior a la razón crítica, entonces depende del cociente  $p(\text{int})/p(\text{atm})$ .

#### **Caudal másico inicial $Q_{M(t=0)}$**

Para su determinación, se considera que el gas es ideal y que el proceso de expansión es adiabático.

La fórmula que utiliza es la [5.13] con dos factores adicionales: el coeficiente de descarga ( $C_d$ ) y un factor de flujo al inicio de la emisión ( $\Psi_0$ ):

$$Q_{M(t=0)} = C_d \psi_0 A_{\text{orif}} P_0 \sqrt{\frac{(PM)\gamma}{RT_0} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (\text{kg/s}) \quad [5.16]$$

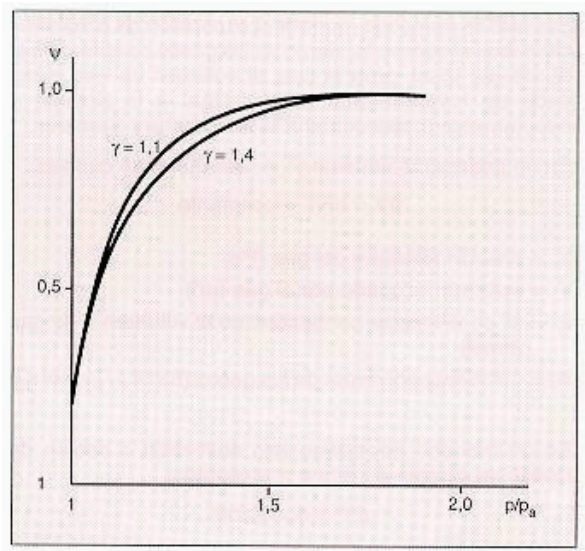
donde:  $C_d$ : es un valor empírico inferior a 1 que tiene en cuenta las pérdidas por viscosidad y turbulencia. Es la relación del caudal real que pasa a través del orificio y el caudal ideal. Un valor usual es 0,85 para casos de rotura y es la estimación óptima para emisiones previstas tecnológicamente (válvulas de alivio, venteo, etc.). Para una boquilla bien redondeada en su unión con el recipiente, es aproximadamente la unidad.

$\Psi_0$ : es un factor función de la razón crítica de presiones [5.10] cuyo valor es la unidad para el flujo sónico o crítico, e inferior a la unidad si la emisión es subsónica. Viene dado por la siguiente expresión, muy similar a la [5.6]:

$$\psi = \sqrt{\left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \frac{2}{\gamma-1} \left[ \left(\frac{P_{\text{atm}}}{P_0}\right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_{\text{atm}}}{P_0}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \quad [5.17]$$

Su representación gráfica frente a  $P_0/P_{\text{atm}}$ , teniendo en cuenta que  $\gamma$  varía entre 1,1 y 1,4 revela que  $\Psi$  vale aproximadamente 1 cuando  $P_0 \geq 1,5 \cdot P_{\text{atm}}$ :

La Gráfica 5.1 muestra la variación de factor  $\Psi$  en función de  $P_0/P_{\text{atm}}$



**Gráfica 5.1.** Factor  $\Psi$  en función de  $P_0/P_{atm}$

### Caudal másico en función del tiempo $Q_M(t)$

Basándose en las mismas suposiciones que en el caudal másico inicial, la NTP-385 presenta la siguiente expresión:

$$Q_M(t) = Q_{M(t=0)} \left[ 1 + \left( \frac{\gamma-1}{2} \right) t_r \right]^{-\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \quad [5.18]$$

en la que  $t_r$  es el tiempo reducido (adimensional) cuyo valor, para gases ideales corresponde a:

$$t_r = \frac{C_d A}{m_0} \left[ P_0 \rho_0 \gamma \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \right]^{\frac{1}{2}} t = \frac{C_d A}{V} \left[ \frac{R T_0}{(PM)} \gamma \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \right]^{\frac{1}{2}} t \quad [5.19]$$

donde:  $m_0$ : masa inicial de gas en el interior del recipiente (kg)  
 $V$ : volumen del recipiente ( $m^3$ )  
 $t$ : tiempo transcurrido desde el instante inicial del derrame (s)  
 $t_r$ : tiempo reducido (adimensional)

### Presión en función del tiempo (proceso adiabático)

La presión del gas en el interior del recipiente va disminuyendo a medida que se vacía su contenido. La ecuación que lo regula es la siguiente:

$$P(t) = P_0 \left[ 1 + \left( \frac{\gamma - 1}{2} \right) \psi t_r \right]^{\frac{-2\gamma}{\gamma - 1}} \quad [5.20]$$

### Caudal másico en función del tiempo a partir de $P(t)$

Si se conoce la presión en función del tiempo, la NPT-385 permite calcular el caudal másico en función del tiempo a partir de la siguiente expresión:

$$Q_M = Q_{M(t=0)} \psi \left[ \frac{P(t)}{P_0} \right]^{\frac{1+\gamma}{2\gamma}} \quad [5.21]$$

### Temperatura en función del tiempo

Considerado el proceso del derrame adiabático y reversible, la temperatura en el interior del recipiente va disminuyendo progresivamente conforme se vacía. Su variación está relacionada con la presión interna existente en cada tiempo considerado.

$$T = T_0 \left[ \frac{P(t)}{P_0} \right]^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad [5.22]$$





## 5.14 Cálculos experimentales

### Supuesto – bombona de etileno.

El objetivo es el de determinar los valores del caudal másico, la presión y la temperatura en función del tiempo en una emisión de gas etileno a través de un orificio de 0,1 cm de diámetro ( $C_d = 0,85$ ) que se encuentra almacenado en una bombona a la temperatura ambiente de 25 °C (298 K). La capacidad de la bombona es de 50 litros, y en su interior el etileno se encuentra a una presión de 30 bares.

Se supone que la transferencia de calor con el entorno es despreciable (adiabático y reversible).

Los datos correspondientes al etileno gas son los siguientes:

Temperatura ebullición:	-104 °C = 169 K
Temperatura crítica:	9,7 °C = 282,7 K
Presión crítica:	50,5 atm = 5,12 MPa
Peso molecular:	28
$\gamma$ :	1,18

El primer paso de todos consiste en determinar el caudal másico inicial a partir de las expresiones [5.16] y [5.17].

Aplicando la ecuación [5.10] se comprueba que al inicio del derrame, el flujo es obstruido, por lo que  $\psi = 1$ .

$$30 \cdot 10^5 \geq 1 \cdot 10^5 \left( \frac{1,18 + 1}{2} \right)^{\frac{1,18}{1,18-1}} \quad \therefore \quad \psi = 1$$

así pues, el caudal másico inicial será:

$$Q_{M(t=0)} = 0,85 \cdot 1 \cdot 0,0785 \cdot 10^{-5} \cdot 30 \cdot 10^5 \sqrt{\frac{28 \cdot 1,18}{8314 \cdot 298} \left( \frac{2}{1,18 + 1} \right)^{\frac{1,18+1}{1,18-1}}} = 0,0026 \text{ kg/s}$$

conocido el caudal másico inicial, se puede pasar a calcular el caudal másico en función del tiempo y el tiempo reducido [5.18] y [5.19]:

$$t_r = \frac{0,85 \cdot 0,0785 \cdot 10^{-5}}{0,05} \sqrt{\frac{8314 \cdot 298}{28} 1,18 \left( \frac{2}{1,18 + 1} \right)^{\frac{1,18+1}{1,18-1}}} t = 0,0025 t \quad [5.16]$$

$$Q_M(t) = 0,0026 \left[ 1 + \left( \frac{1,18 - 1}{2} \right) 0,0025 t \right]^{-\frac{1,18+1}{1,18-1}} = 0,0026 (1 + 0,000225 t)^{-12,11} \quad [5.18]$$

La presión en el recipiente en función del tiempo será:

$$P(t) = 30 \cdot 10^5 \left[ 1 + \left( \frac{1,18 - 1}{2} \right) \cdot 1 \cdot 0,00225 t \right]^{\frac{-2 \cdot 1,18}{1,18 - 1}} = 30 \cdot 10^5 (1 + 0,000225 t)^{-13,11}$$

y el tiempo que tarda en alcanzar la razón crítica [5.10] será:

$$30 \cdot 10^5 (1 + 0,000225 t)^{-13,11} = 1,01 \cdot 10^5 \left( \frac{1,18 + 1}{2} \right)^{\frac{1,18}{1,18 - 1}} \quad \therefore \quad t = 1320 \text{ s}$$

La variación (descenso) de temperatura que experimentará el fluido en el interior del tanque conforme se vacía vendrá dada por [5.21]

$$T = 298 \left[ \frac{30 \cdot 10^5 (1 + 0,000225 t)^{-13,11}}{30 \cdot 10^5} \right]^{\frac{1,18 - 1}{1,18}} = 298 (1 + 0,000225 t)^{-2}$$

Desde que se inicia el derrame hasta que se llega al punto donde el flujo pasa de sónico (obstruido) a subsónico, los cálculos son relativamente sencillos con la ayuda de [5.16], [5.18], [5.20] y [5.22] y una hoja de cálculo.

Por encima de  $t = 1320$  segundos, el flujo ya es subsónico y el coeficiente del flujo de emisión o factor de flujo  $\psi$  será distinto de la unidad.

En esta situación, los cálculos del caudal másico y presión en el interior del tanque se complican notoriamente ya que:

$$\psi = f(P(t))$$

$$P = f(\psi, t)$$

Para su determinación, la NTP 385 propone el siguiente sistema de cálculo, basado en dividir la fase subsónica en cierto número de intervalos que irán de  $P(t)_n$  a  $P(t)_{n+1}$ , donde el punto de partida está en  $t = 1,14$  (paso de flujo sónico a subsónico).

El algoritmo a seguir para establecer los intervalos es el siguiente:

$$P(t)_{n+1} = P(t)_n + \frac{1 - P(t)_n}{2}$$

y para limitar la inexactitud de la operación de promediado de  $\psi$ , trabaja con los valores  $P_{atm}/P(t)_n$ .

El uso del programa informático APPO para este mismo supuesto, aporta las siguientes ventajas:

- No hay que recurrir a hojas de cálculo para determinar la evolución de los diferentes parámetros de la bombona en función del tiempo.
- Da la información global de todo el proceso: evaporación "flash", influencia de la temperatura y tipo de suelo, radiación solar y velocidad del viento.
- Mayor rapidez de cálculo.
- Más seguridad en las operaciones matemáticas (no equivocaciones).
- Aporta las constantes físico-químicas de la materia peligrosa implicada en el accidente que son necesarias para realizar los cálculos.
- Los resultados junto con los "datos de inicio" aparecen todos en una misma pantalla: toda la información en un único campo visual.
- Permite enlazar los resultados a posibles nuevas situaciones: área del derrame, incendio, explosión, etc.

El esquema 5.1 muestra la pantalla de entrada y salida de datos del modelo APPO para un derrame de etileno procedente de un tanque esférico.

**ETILENO** **Nº ONU: 1038** **FICHA DE SEGURIDAD**

**Datos del Depósito**

- Volumen [litros] 50
- Cuadrado
- Cilíndrico horizontal
- Cilíndrico vertical
- Esférico

Altura [metros] \_\_\_\_\_

Lado 1 [metros] \_\_\_\_\_

Lado 2 [metros] \_\_\_\_\_

Radio [metros] \_\_\_\_\_

Temperatura 25 [°C]

Presión 30 [atm]

Diámetro orificio 0,1 [cm]

Cd 0,85

**Tabla de Datos:**

Tiempo [s]	Tipo de flujo	Presión int [Pa]	Temp int [K]	Temp int [°C]	Densitat f(T) [kg/m <sup>3</sup> ]	Caudal masico [kg/s]	Velocidad fuga [m/s]
0	Sonico	3039750	298	24,99	34,397	0,000257926	439,16
10	Sonico	2949532	296	22,8	33,546	0,00025084	439,16
20	Sonico	2862628	295	21,8	32,706	0,000244	439,16
30	Sonico	2778823	293	19,8	31,892	0,00023739	439,16
40	Sonico	2698013	292	18,8	31,104	0,00023101	439,16
50	Sonico	2620067	291	17,8	30,34	0,00022483	439,16
60	Sonico	2544865	290	16,8	29,6	0,00021886	439,16
70	Sonico	2472298	288	14,8	28,883	0,00021309	439,16
80	Sonico	2402253	287	13,8	28,187	0,00020751	439,16
90	Sonico	2334621	286	12,8	27,513	0,0002021	439,16

Tiempo estimado de derrame 27,83 [minutos]

**EXPORTAR**

**Gráfico:** Presión interior [Pa] vs. tiempo [segundos]. La curva muestra una disminución exponencial de la presión interior desde aproximadamente 3.000.000 Pa a los 0 segundos hasta cerca de 250.000 Pa a los 1.600 segundos.

**Opciones de Gráfico:**

- Presión interior [Pa]
- Temperatura interior [°C]
- Caudal masico [kg/s]
- Velocidad [m/s]
- Masa interior [kg]
- Longitud llame [m]
- Potencia radiacion emitida [J/s]

**Botones de Acción:** CALCULAR, QTRO CALCULO, INFORME, SALIR

**Esquema 5.1.** Pantalla de entrada y salida de datos del modelo APPO para un derrame de etileno procedente de un tanque esférico.



**Derrame de líquidos  
procedentes de tanques  
presurizados.**

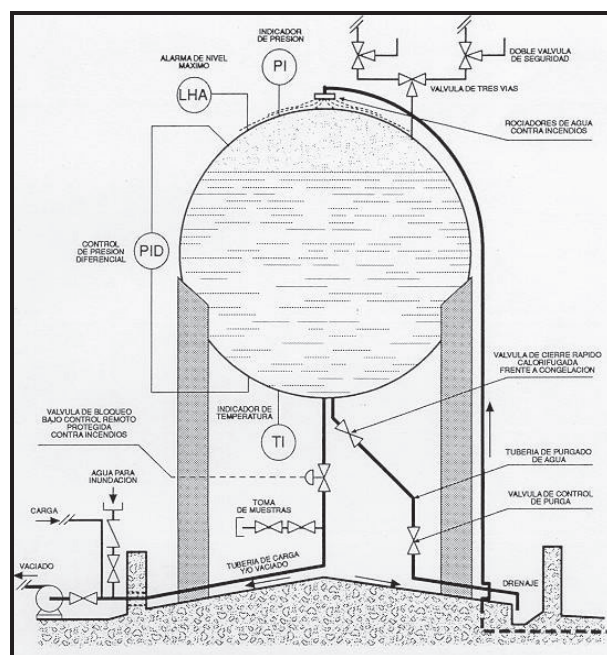
CAPITULO  
**6**





## 6.1 Introducción

El caso de los líquidos almacenados a presión corresponde básicamente a los llamados **gases licuados**, los cuales tienen unas propiedades físico-químicas diferentes a los líquidos y gases comunes, por lo que merecen un capítulo específico para ellos. La Figura 6.1 muestra un depósito de almacenamiento de gas licuado con sus elementos básicos de seguridad

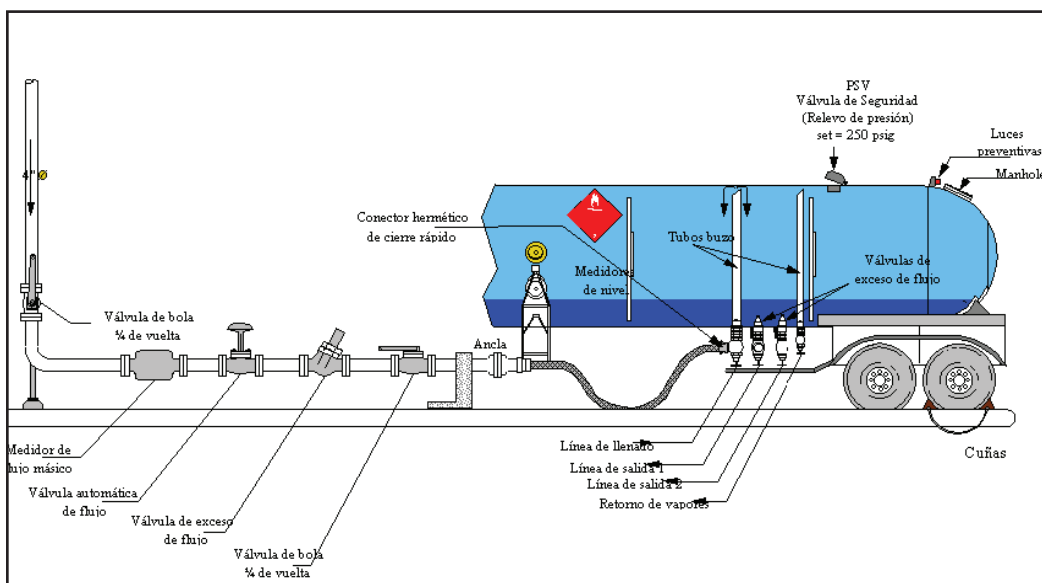


**Figura 6.1.** Instalación de depósito de almacenamiento de gas licuado con sus elementos básicos de seguridad

El peligro que tienen tales productos, se origina cuando se produce una fuga y un derrame por un accidente o fallo del recipiente contenedor, accesorio, equipo o conducción del gas licuado a presión.

La temperatura inicial del líquido es la ambiental si el depósito está en equilibrio térmico con el medio ambiente. El gas licuado que escapa y se derrama normalmente está a una temperatura superior a su temperatura de ebullición a presión atmosférica, de ahí su nombre de *líquido sobrecalentado*

Al producirse la pérdida de contención, el gas licuado sufre un descenso súbito de su presión de almacenamiento (la presión de vapor correspondiente a la temperatura de almacenamiento) hasta la presión atmosférica. Esto da lugar a una evaporación instantánea, también llamada *evaporación flash*, que al mismo tiempo puede arrastrar una cantidad considerable de líquido en forma de aerosol (pequeñas gotas). Una parte de esas gotas puede volver a caer al suelo en forma de lluvia (rain out) debido al enfriamiento y condensación. Otra parte se evaporará a causa de la absorción de calor procedente del aire ambiente que se mezcla con el fluido emitido. La Figura 6.2 muestra un Sistema de carga-descarga de gases licuados.



**Figura 6.2.** Sistema de carga-descarga de gases licuados (fuente: manual de descarga de la compañía Carbueros Metálicos)..

La parte de gas licuado restante forma un charco de líquido en el suelo que está a una temperatura igual a la de ebullición, la cual es muy baja con respecto a la temperatura del suelo. Si el derrame es de poca magnitud, la evaporación del charco es muy rápida y todo el gas licuado se incorpora a la atmósfera en muy poco tiempo. En derrames importantes, tras la rápida evaporación inicial, el suelo (substrato) sufre un enfriamiento suficiente para que la subsiguiente evaporación del charco transcurra de forma menos rápida.

La Tabla 6.1 muestra las Propiedades físicas de varios gases criogénicos (datos recopilados del "Manual de Gases Comprimidos" de la Asociación de Gases Comprimidos)

A la presión de 1 atm (1013 mbar)					a 21 °C y 101 kPa	
GAS	Temperatura ebullición (°C)	Densidad líquido (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad del gas (kg/m <sup>3</sup> )	Calor latente (KJ/kg)	Densidad del gas (kg/m <sup>3</sup> )	Factor de expansión
Aire	-194,3	87,5	--	205,1	0,120	728
Argón	-158,9	139,3	0,570	163,3	0,165	842
Etileno	-103,7	56,7	0,208	483,3	0,115	487
Flúor	-188,1	150,7	0,581	172,3	0,160	961
Helio	-268,9	12,5	0,170	23,9	0,016	754
Hidrógeno	-252,8	7,1	0,134	448,2	0,008	850
Metano	-161,5	42,4	0,178	509,8	0,067	636
Nitrógeno	-195,8	80,8	0,461	199,3	0,115	696
Oxígeno	-183,0	114,2	0,474	213,3	0,133	831

Tabla 6.1. Propiedades físicas de varios gases criogénicos (datos recopilados del "Manual de Gases Comprimidos" de la Asociación de Gases Comprimidos)

La Tabla 6.2 muestra la densidad máxima de llenado permitida. GLP a temperaturas normales en recipientes no aislados térmicamente. CPA = capacidad en peso de agua.

Densidad relativa (60 °F)	Depósitos en superficie				Todos los depósitos subterráneos	
	0 a 200 gal <sup>2</sup>		más de 200 gal <sup>2</sup>		% de CPA	% de vol a 60 °F
	% de CPA	% de vol a 60 °F	% de CPA	% de vol a 60 °F		
0,504-0,510	42	82,6	45	88,5	46	90,5
0,511-0,519	43	83,5	46	89,4	47	91,3
0,520-0,527	44	84,3	47	90,0	48	91,8
0,528-0,536	45	84,7	48	90,3	49	92,2
0,537-0,544	46	85,2	49	90,7	50	92,5
0,545-0,552	47	85,6	50	91,2	51	93,0
0,553-0,560	48	86,4	51	91,8	52	93,6
0,561-0,568	49	87,0	52	92,3	53	94,1
0,569-0,576	50	87,5	53	92,7	54	94,4
0,577-0,584	51	87,9	54	93,1	55	94,8
0,585-0,592	52	88,3	55	93,5	56	95,1

Tabla 6.2. Densidad máxima de llenado permitida.

## 6.2 El balance de energía mecánica

En el caso de los tanques presurizados (sistema de almacenaje típico de los gases licuados y similares), también es de gran utilidad el balance de energía mecánica, punto de partida para estimar los efectos mecánicos en el flujo de fluidos, prestando una especial atención al término del trabajo o energía de flujo, donde el factor  $\Delta P$  tiene un papel decisivo en los valores de la velocidad y tiempo de derrame.

$$g dz + v dv + \frac{dp}{\rho} + d(\Sigma F) + dW_s = 0$$

Considerando las mismas simplificaciones realizadas en el capítulo 4 (derrame de líquidos procedentes de tanques no presurizados), el balance de energía mecánica en su forma integrada queda de la siguiente forma:

$$g \Delta z + \frac{u_1^2}{2} + \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{2 (0,0014 + 0,125 \text{Re}^{0,32}) 0,548 (100 d)^{1,09} u_1^2}{d} = 0 \quad [6.1]$$

$$g \Delta z + \frac{u_1^2}{2} + \frac{\Delta P}{\rho} + 165,3 u_1^2 d^{0,09} \left[ 0,0014 + 0,125 \left( \frac{\mu}{\rho u_1 d} \right)^{0,32} \right] = 0 \quad [6.1 \text{ bis}]$$



### 6.3 Determinación de la velocidad de derrame $u_1$

Despejando la variable  $u_1$  del balance de energía mecánica indicado en la ecuación [6.1 bis], se obtiene la expresión de la velocidad de derrame, que para su resolución es preciso utilizar el teorema de Taylor (igual que en el punto 4.3), pues resulta muy complejo el situar la variable  $u_1$  en un único miembro:

$$u_1^2 = \frac{-2 \left( g \Delta z + \frac{\Delta P}{\rho} \right)}{1 + 331 d^{0,09} \left[ 0,014 + 0,125 \left( \frac{\mu}{\rho d} \right)^{0,32} \right]}$$





### 6.4 Estimación del tiempo de derrame

Aplicando al orificio de salida del depósito (estado 1) la definición de caudal volumétrico  $Q_{L1}$ , y recordando que en estos casos, la velocidad de salida  $u_1$  depende no solo del nivel del líquido en el interior del tanque  $\Delta z$  sino también de la presión en el interior del mismo  $\Delta P$ :

$$Q_{L1} = Q_{L0} = \frac{dV}{dt} = \frac{A_0 dz}{dt} = -A_0 \frac{dh}{dt}$$

El tiempo de derrame vendrá determinado por la siguiente ecuación diferencial, en la que se ha incluido también el coeficiente de descarga  $C_d$  (capítulo 4, punto 4.4 de esta tesis):

$$dt = \frac{-A_0 dh}{Q_{L1}} = \frac{-A_0 dh}{A_{\text{orif}} u_1}$$

$$dt = \frac{-A_0}{A_{\text{orif}}} \frac{\sqrt{1 + 331 d^{0,09} \left[ 0,0014 + 0,125 \left( \frac{\mu}{\rho d} \right)^{0,32} \right]}}{C_d} \frac{dh}{\sqrt{+2gh - \frac{2 \Delta P}{\rho}}} \quad [6.3]$$

En el que el valor de  $\Delta P$  indica en definitiva la diferencia de presiones que se observa en la fase vapor del interior del tanque. La presión final no tiene por qué coincidir con la atmosférica, pues una vez evacuado el líquido y evaporado algo de él (conforme se va vaciando el depósito, la presión en su interior desciende cabiendo la posibilidad de que se llegue al punto de ebullición del gas licuado), todavía queda en el interior del tanque vapor a una determinada presión  $P_1$ , tal como se ilustra en la Figura 6.3.

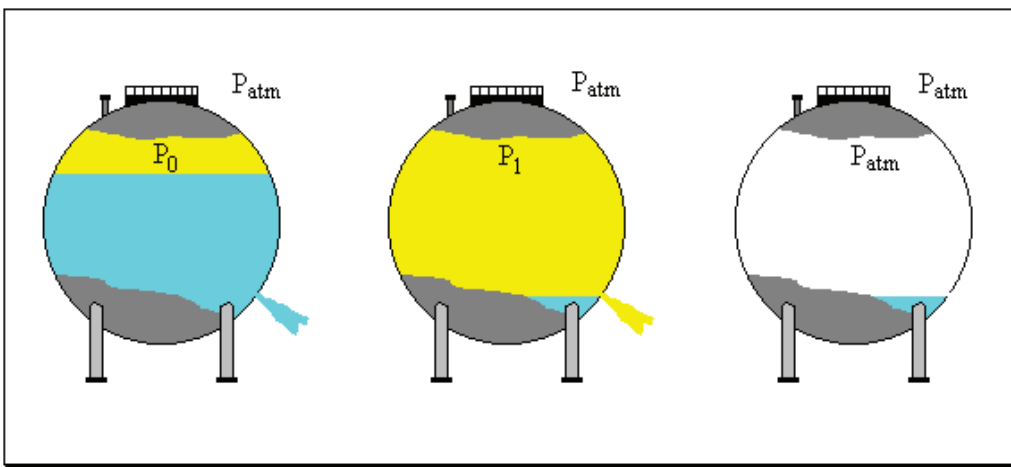


Figura 6.3. Vaciado de depósitos presurizados.

Si se considera que la fase vapor se comporta como un gas ideal, entonces el cálculo de  $\Delta P$ , que es función del volumen  $V_i$ , dependerá de la geometría del depósito.

$$P_i = \frac{n R T_i}{V_i}$$

### Tanque rectangular fondo plano

Dada la geometría del depósito, y considerado el comportamiento de la fase gaseosa como un gas ideal, el tiempo de derrame vendrá dado por la ecuación [6.3], con la salvedad de que en este caso el nivel del líquido estará representado por  $h$ .

Así, la ecuación a resolver es la siguiente:

$$t = \frac{-4 W L}{\pi d^2 C_d} \int_{h=z_1}^{h=z_2} \frac{dh}{\sqrt{\frac{1 + 331 d^{0.09} \left[ 0,0014 + 0,125 \left( \frac{\mu}{\rho d} \right)^{0,32} \right]}{2} g h - \frac{\Delta P}{\rho}}} \quad [6.4]$$

que integrada resulta la siguiente expresión:

$$t = \frac{-8 W L}{\pi g d^2 C_d} \sqrt{\frac{1 + 331 d^{0.09} \left[ 0,0014 + 0,125 \left( \frac{\mu}{\rho d} \right)^{0,32} \right]}{2}} \left[ \sqrt{g z_2 - \frac{\Delta P}{\rho}} - \sqrt{g z_1 - \frac{\Delta P}{\rho}} \right] \quad [6.5]$$

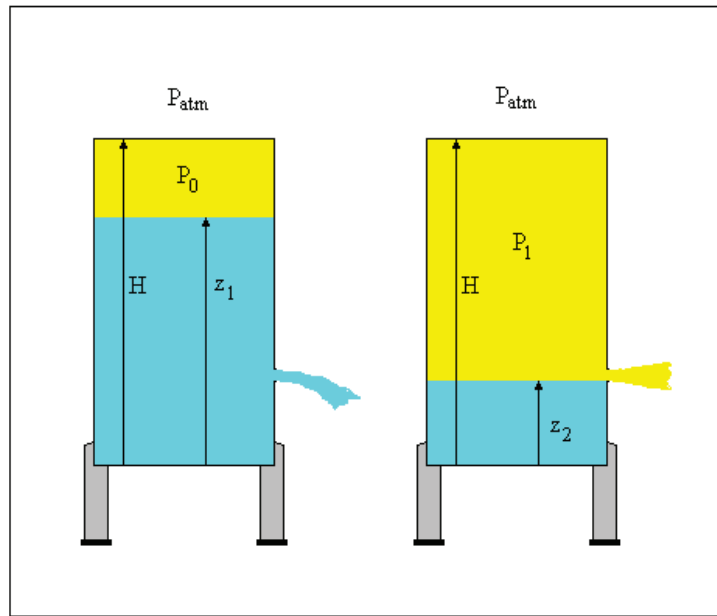
donde el valor de  $\Delta P$  se puede calcular a partir de la ecuación de los gases ideales. Si se considera válido el suponer que la variación de temperatura en la expansión del gas es despreciable, entonces:

$$P_0 V_0 = P_1 V_1 \quad \therefore \quad P_1 = \frac{P_0 (H - z_1)}{(H - z_2)}$$

$$\Delta P = P_1 - P_0 = \frac{P_0 (H - z_1)}{H - z_2} - P_0 = \frac{P_0 (z_2 - z_1)}{H - z_2} \quad [6.6]$$

donde hay que observar que  $z_2 - z_1 < 0$ , y que  $H - z_2 > 0$ .

La Figura 6.4 muestra el Vaciado de tanque rectangular fondo plano presurizado.



**Figura 6.4.** Vaciado de tanque rectangular fondo plano presurizado.

### Tanque cilíndrico vertical fondo plano

Considerando las mismas premisas que en el apartado 4.3.1, la ecuación a resolver para este tipo de depósitos es la siguiente:

$$t = \frac{-\pi \frac{D^2}{4}}{\pi \frac{d^2}{4} C_d} \sqrt{\frac{1 + 331 d^{0,09} \left[ 0,0014 + 0,125 \left( \frac{\mu}{\rho d} \right)^{0,32} \right]}{2}} \int_{h=z_2}^{h=z_1} \frac{dh}{\sqrt{gh - \frac{\Delta P}{\rho}}} \quad [6.7]$$

cuya resolución corresponde a:

$$t = \frac{-2 D^2}{g C_d d^2} \sqrt{\frac{1 + 331 d^{0,09} \left[ 0,0014 + 0,125 \left( \frac{\mu}{\rho d} \right)^{0,32} \right]}{2}} \left[ \sqrt{gz_2 - \frac{\Delta P}{\rho}} - \sqrt{gz_1 - \frac{\Delta P}{\rho}} \right] \quad [6.8]$$

Las diferencias en lo que a velocidad y tiempo se refiere, se hacen patentes en la parte experimental de la memoria.

### Tanque cilíndrico horizontal

Al igual que en los casos anteriores la ecuación a resolver es la siguiente (véase el capítulo 4, punto 4.5 de esta Tesis):

$$dV = 2L \sqrt{2Rh - h^2} dh$$

$$t = \frac{-2L}{\pi \frac{d^2}{4} C_d} \sqrt{\frac{1 + 331 d^{0,09} \left[ 0,0014 + 0,125 \left( \frac{\mu}{\rho d} \right)^{0,32} \right]}{2}} \int_{h=z_1}^{h=z_2} \sqrt{\frac{2Rh - h^2}{gh - \frac{\Delta P}{\rho}}} dh \quad [6.9]$$

expresión que contiene una integral del tipo *elíptica*, que para su resolución ha sido preciso recurrir a programas informáticos de integración:

$$t = \int_{h=z_1}^{h=z_2} \sqrt{\frac{2Rh - h^2}{gh - \frac{\Delta P}{\rho}}} dh$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{3g^2\rho^2} \left( -g\rho \sqrt{\frac{\rho z_1(-2R+z_1)}{\Delta P - g\rho z_1}} (-\Delta P + g\rho z_1) + g\rho \sqrt{\frac{\rho z_2(-2R+z_2)}{\Delta P - g\rho z_2}} (-\Delta P + g\rho z_2) - \right. \\
&\left. \left( 2\Delta P \sqrt{\frac{\rho z_1(-2R+z_1)}{\Delta P - g\rho z_1}} \left( \sqrt{\frac{z_1}{R}} (-\Delta P + gR\rho)(2R - z_1) \sqrt{\frac{g\rho z_1}{\Delta P}} \sqrt{\frac{\Delta P - g\rho z_1}{\Delta P - 2gR\rho}} \text{EllipticE}[\phi_1, m] + \right. \right. \right. \\
&\left. \left. \left. gR\rho \sqrt{\frac{g\rho(2R - z_1)}{-\Delta P + 2gR\rho}} z_1 \text{EllipticF}[\phi_1, m] \sqrt{2 - \frac{z_1}{R}} \sqrt{1 - \frac{g\rho z_1}{\Delta P}} \right) \right) / \left( (2R - z_1) \sqrt{\frac{g\rho(2R - z_1)}{-\Delta P + 2gR\rho}} z_1 \sqrt{\frac{z_1}{R}} \right) \\
&+ \left( 2\Delta P \sqrt{\frac{\rho z_2(-2R+z_2)}{-\Delta P + 2gR\rho}} \left( \sqrt{\frac{z_2}{R}} (-\Delta P + gR\rho)(2R - z_2) \sqrt{\frac{g\rho z_2}{\Delta P}} \sqrt{\frac{\Delta P - g\rho z_2}{\Delta P - 2gR\rho}} \right. \right. \\
&\left. \left. \text{EllipticE}[\phi_2, m] + gR\rho \sqrt{\frac{g\rho(2R - z_2)}{-\Delta P + 2gR\rho}} z_2 \text{EllipticF}[\phi_2, m] \sqrt{2 - \frac{z_2}{R}} \sqrt{1 - \frac{g\rho z_2}{\Delta P}} \right) \right) / \\
&\left. \left( (2R - z_2) \sqrt{\frac{g\rho(2R - z_2)}{-\Delta P + 2gR\rho}} z_2 \sqrt{\frac{z_2}{R}} \right) \right)
\end{aligned}$$

donde:

$$\text{EllipticE}[\phi, m] = \int_0^\phi \sqrt{1 - m \sin^2 \phi} d\phi$$

$$\phi = \arcsen \left[ \sqrt{\frac{\Delta P - g \rho z_i}{\Delta P - 2gR\rho}} \right]$$

$$m = 1 - \frac{2gR\rho}{\Delta P}$$

$$\text{EllipticF}[\phi, m] = \int_0^\phi \frac{1}{\sqrt{1 - m \text{sen}^2 \phi}} d\phi$$

$$\phi = \arcsen \left[ \frac{\sqrt{\frac{z_i}{R}}}{\sqrt{2}} \right]$$

$$m = \frac{2gR\rho}{\Delta P}$$

### Tanque esférico

Considerando la geometría del depósito, y más concretamente su elemento diferencial  $dV$  (véase el capítulo 4, punto 4.5 de esta Tesis), se obtiene la siguiente ecuación diferencial:

$$dV = \pi [R^2 - (h - R)^2] dh$$

$$t = \frac{-4}{d^2 C_d} \sqrt{\frac{1 + 331 d^{0,09} \left[ 0,0014 + 0,125 \left( \frac{\mu}{\rho d} \right)^{0,32} \right]}{\frac{2}{\rho}}} \int_{h=z_1}^{h=z_2} \frac{2Rh - h^2}{\sqrt{\rho gh - \Delta P}} \quad [6.11]$$

que aplicándole el método de integración por partes, varias veces, se obtiene la siguiente expresión:

$$t = \frac{-4}{d^2 C_d} \sqrt{\frac{1 + 331 d^{0,09} \left[ 0,0014 + 0,125 \left( \frac{\mu}{\rho d} \right)^{0,32} \right]^2}{\frac{2}{\rho}}} \cdot \left. \left\{ \frac{8(\rho gh - \Delta P)^{\frac{1}{2}}}{(\rho g)^2} \left[ \frac{\rho g}{4} (2Rh - h^2) + \frac{(h - R)}{3} (\rho gh - \Delta P) + \frac{1}{5} (\rho gh - \Delta P)^2 \right] \right\} \right|_{h=z_1}^{h=z_2} \quad [6.12]$$



## 6.5 El modelo de Fauske para gases licuados

Este método se usa para estimar la velocidad de vaciado de un depósito que contiene uno o más fluidos en dos fases (gas-líquido). Basándose en los estudios teóricos y experimentales realizados por Fauske y sus asociados en el Design Institute for Emergency Relief Systems (DIERS), se llegó a la siguiente ecuación:

$$Q_M = 0,104 D^2 \left( \frac{dP}{dT} \right) \sqrt{\frac{T}{C_P}} \quad [6.13]$$

donde:

- $Q_M$ : caudal de vaciado (libras/minuto)
- $D$ : diámetro del orificio o tubería (pulgadas)
- $T$ : temperatura (K)
- $C_P$ : capacidad calorífica del líquido [Btu/(libras-K)]
- $\frac{dP}{dT}$ : pendiente de la curva de presión de vapor (mm Hg/K)

cuando se trata de un solo fluido:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{dP_s}{dT} = \frac{P_s \ln\left(\frac{P_s}{760}\right)}{T - T_b} \quad [6.14]$$

en la que:  $P_s$ : presión de vapor del fluido a la temperatura  $T$  (mm Hg)

$T_b$ : punto de ebullición a 760 mm Hg (K)

El modelo contempla que los efectos friccionales y la geometría del depósito son despreciables. En el balance de energía mecánica, la variable presión es la determinante.

## 6.6 Caudal másico del derrame de un gas licuado $Q_M$

Los cálculos de estimación del tiempo que tarda en vaciarse un depósito que contiene un fluido, se basan prácticamente en la diferencia de presiones existentes entre el ambiente y la presión a la que se encuentra almacenado el fluido (lógicamente función de la temperatura de almacenamiento).

En base a estas variables indicadas, Azor Kumar y Irfan Patel proponen para un líquido presurizado en dos fases (gas licuado) la siguiente fórmula:

$$Q_M = A_O \left[ \frac{\lambda (PM) P_S}{R T_S^2} \right] \sqrt{\frac{T_S}{N C_{p\lambda}}} \quad [6.15]$$

donde:

- $Q_M$ : caudal másico (kg/s)
- $A_O$ : área del orificio (m<sup>2</sup>)
- $\lambda$ : calor de vaporización a  $T_b$  (J/kg)
- (PM): peso molecular (kg/kmol)
- $P_S$ : presión de almacenamiento (Pa)
- $R$ : 8314 [J/(K·kmol)]
- $T_S$ : temperatura de almacenamiento (K)
- $C_{p.}$ : capacidad calorífica del líquido a  $T_S$  [J/K·kg]

- $P_a$ : presión ambiente (Pa)  
 $\rho_\lambda$ : densidad del líquido a  $T_s$  ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $C_d$ : coeficiente de descarga (adimensional)  
 $T_b$ : punto normal de ebullición (K)  
 $L_p$ : longitud de la tubería (m)  
 $L_e$ : longitud de tubería para que el flujo esté en equilibrio (m)

$$N = \left[ \frac{R (\lambda (PM) P_s)^2}{2 (P_s - P_a) \rho_\lambda C_d^2 (R T_s)^3 C_{P\lambda}} \right] + \left[ \frac{L_p}{L_e} \right]$$

teniendo en cuenta que el derrame considerado es directamente desde el tanque y no desde una tubería,  $L_p = 0$  por lo que la ecuación [6.15] se simplifica considerablemente:

$$Q_M = A C_d \sqrt{2 (P_s - P_a) \rho_\lambda} \quad [6.15 \text{ bis}]$$

ecuación que coincide con la que se obtendría al aplicar a la ecuación de Bernoulli las condiciones del derrame de un fluido sometido a presión, en el que se desprecia el término correspondiente a la energía potencial (diferencia de alturas entre la del nivel del fluido y la del orificio) frente al correspondiente al trabajo debido al flujo (diferencia de presiones entre el interior del tanque y el exterior).

### 6.7 Caudal másico del derrame de gas licuado $Q_M$ [NTP 326]

La Nota Técnica de Prevención número 326 - fugas en recipientes y conducciones: emisión en fase líquida-, contempla para la estimación del caudal másico del derrame, la diferencia de alturas entre el nivel del fluido y el orificio de salida:

$$Q_M = A C_d \sqrt{2 (P_s - P_a) \rho_\lambda + 2 \rho_\lambda g h} \quad [6.16]$$

en la que:   g:     9,8 m/s<sup>2</sup>  
              h:     diferencia de alturas entre el nivel de la fase líquido y el orificio



### 6.8 Derrame de fase gaseosa gas licuado. Flujo obstruido

Para poder determinar el caudal másico de emisión  $Q_M$  en condiciones de flujo obstruido, Azor Kumar y Irfan Patel proponen el cálculo de varios parámetros previos:

#### Temperatura en condiciones de flujo obstruido $T^*$

La cual se determina a partir de la ecuación de Clausius-Clapeyron:

$$P^* = 101325 \cdot P_a \cdot e^{\left[ \frac{\lambda (PM)}{R} \left( \frac{1}{T_b} - \frac{1}{T^*} \right) \right]} \quad \therefore \quad T^* = \left[ \frac{1}{T_b} - \frac{R}{\lambda (PM)} \ln \left( \frac{P^*}{101325 \cdot P_a} \right) \right]^{-1} \quad [6.17]$$

donde:

- $T^*$ : temperatura en condiciones de flujo obstruido (K)
- $P^*$ : presión en condiciones de flujo obstruido (Pa)
- $P_a$ : presión ambiente (Pa)
- $\lambda$ : calor de vaporización a  $T_b$  (K)
- (PM): masa molecular (kg/kmol)
- R: 8314 [J/(K kmol)]
- $T_b$ : temperatura de ebullición (K)

**Fración másica de vapor en condiciones de flujo obstruido**

$$F^* = 1 + \frac{T^*}{(PM) \lambda} \left[ (PM) C_p \ln \left( \frac{T_S}{T^*} \right) - R \ln \left( \frac{P_S}{P^*} \right) \right] \quad [6.18]$$

donde:  $F^*$ : fracción másica de vapor en condiciones de flujo obstruido  
 $T_S$ : temperatura de almacenamiento (K)  
 $P_S$ : presión de almacenamiento (Pa)  
 $C_p$ : capacidad calorífica del gas a  $T_S$  [J/(K kg)]

**Cambio de entalpía al pasar de condiciones de almacenamiento a flujo obstruido**

$$\Delta H^* = C_p (T_S - T^*) + \lambda (1 - F^*) \quad [6.19]$$

**Densidad en condiciones de flujo obstruido**

$$\rho^* = \left[ F^* \left( \frac{R T^*}{P^* (PM)} \right) + \left( \frac{1 - F^*}{\rho_l} \right) \right]^{-1} \quad [6.20]$$

donde:  $\rho_l$ : densidad del líquido (kg/m<sup>3</sup>)



**Caudal másico  $Q_M$** 

$$Q_M = A_O \rho^* \sqrt{2 \cdot 0,85 \cdot \left[ \frac{\Delta H^*}{\left( 1 + \frac{4 f L_P}{D_P} \right)} \right]} \quad [6.21]$$

donde:

- $Q_M$ : caudal másico (kg/s)
- $A_O$ : área del orificio (m<sup>2</sup>)
- $f$ : coeficiente de fricción (adimensional)
- $L_P$ : longitud de la conducción (m)
- $D_P$ : diámetro de la conducción (m)



### 6.9 Derrame en fase gaseosa de un gas licuado. Flujo no obstruido

El caudal másico para un derrame en fase gaseosa de un gas licuado puede determinarse mediante la siguiente ecuación:

$$Q_M = A_O \rho_{\text{der}} \sqrt{2 \cdot 0,85 \cdot \left[ \frac{\Delta H^*}{\left( 1 + \frac{4 f L_P}{D_P} \right)} \right]} \quad [6.22]$$

donde:  $\rho_{\text{der}}$ : densidad del derrame ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $f$ : factor de fricción; habitualmente 0,0045 (adimensional)



## 6.10 Cálculos experimentales

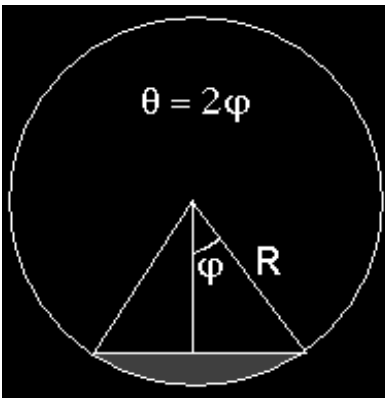
### Supuesto práctico nº 1

Calcular el caudal de emisión de un derrame de propano licuado contenido en un depósito cilíndrico horizontal de almacenamiento a través de un orificio de 10 mm de diámetro. La presión de almacenamiento es la presión de vapor del propano a la temperatura de 25 °C y el orificio de descarga está 1,5 metros por debajo del nivel del gas licuado.

Diámetro del depósito:	4 m
Longitud del depósito:	7 m
Contenido:	50 m <sup>3</sup> propano licuado
Coefficiente de descarga:	$C_d = 0,61$
Densidad del propano licuado:	$\rho_\lambda = 490 \text{ kg/m}^3$
Presión de vapor del propano a 25 °C:	$P_s = 9,3 \text{ bar} = 9,3 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
Punto de ebullición:	$T_b = 231 \text{ K}$
Calor de vaporización a $T_b$	$\lambda = 4,3 \cdot 10^5 \text{ J/kg}$
Propano $\gamma =$	1,13
Propano (PM) =	44

(datos extraídos de la norma NTP 326)

La determinación del nivel del gas licuado en el depósito se realiza, al igual que en el supuesto número 3 del capítulo 4, a partir de la fórmula de la longitud del segmento de un círculo de radio R.



$$S = \frac{1}{2} R^2 (\theta - \text{sen } \theta) \quad (\theta \text{ en radianes})$$

$$\cos \varphi = \frac{R-h}{R} \quad \therefore \quad \varphi = \text{arc cos } \frac{R-h}{R} \quad (\text{radianes})$$

$$\theta = 2\varphi = 2 \text{ arc cos } \frac{R-h}{R}$$

El área del recipiente se puede estimar mediante la siguiente ecuación:

$$S = \frac{1}{2} R^2 \left[ 2 \text{ arc cos } \frac{R-h}{R} - \text{sen} \left( 2 \text{ arc cos } \frac{R-h}{R} \right) \right] \quad (\text{m}^2)$$

$$\text{Volumen} = S \cdot \text{longitud del depósito} \quad (\text{m}^3)$$

en el que los  $50 \text{ m}^3$  de propano licuado corresponden a  $h_{\text{prop}} = 2,216 \text{ m}$

y consecuentemente  $h_{\text{orif}} = 2,216 - 1,5 = 0,716 \text{ m}$

Así pues, como valor inicial del derrame, el caudal másico se obtendrá a partir de la ecuación [6.16]:

$$Q_M = 0,61 \cdot 7,85 \cdot 10^{-5} \sqrt{2(9,3 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^5) 490 + 2 \cdot 490 \cdot 9,8 \cdot 1,5} = 1,366 \text{ kg/s}$$

considerando despreciable la influencia del factor de energía potencial, la determinación del caudal másico quedaría como [6.15 bis]:

$$Q'_M = 0,61 \cdot 7,85 \cdot 10^{-5} \sqrt{2(9,3 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^5) 490} = 1,366 \text{ kg/s}$$

Se observa que las diferencias entre las dos ecuaciones son insignificantes, por lo que en cálculos sucesivos, no se tendrán en cuenta las diferencias de altura entre nivel del fluido y el orificio por donde es derramado.

Conforme se derrama el fluido, el nivel de este en el interior del depósito va descendiendo, y la presión en el interior del depósito debería descender, no obstante, en la realidad no ocurre esto, pues a medida que la presión en el interior del tanque va disminuyendo el gas licuado comienza a evaporarse manteniéndose así la presión de vapor (salvo que la velocidad de derrame sea superior a la de evaporación).

Considerando que se alcanza este equilibrio y en el interior del depósito se mantiene la presión de vapor del propano (velocidad de derrame  $\leq$  velocidad evaporación), basta con conocer entre los dos niveles qué cantidad de propano hay para determinar cuanto tiempo tardará en vaciarse el depósito de propano licuado.

Cuando  $h$  es igual a 2,216 m, el volumen de propano licuado es de 50 m<sup>3</sup>



Si  $h$  es igual a 0,716 m, el volumen es ahora de 10,7 m<sup>3</sup>

Por lo tanto, la masa de propano licuado derramado será:  $490 \cdot (50-10,7) = 19257$  kg

El tiempo que tarda en vaciarse será:  $t = 19257/1,366 = 14097$  s

Una vez llegado el propano licuado a este nivel en el interior del depósito ( $h = 0,716$  m), se empezará a derramar vapor y no "líquido".

Por contrapartida, utilizando el método de Fauske se obtienen los siguientes valores al aplicar las ecuaciones [6.13] y [6.14]

Presión de vapor del propano a 25 °C:  $9,3 \cdot 10^5$  Pa = 6980 mm Hg

Diámetro del orificio:  $10$  mm =  $3,94 \cdot 10^{-1}$  pulgadas

$C_p = 9121,18$  J/(K kg) =  $1,58 \cdot 10^{-1}$  BTU/(K libra)

La variación de la presión con respecto a la temperatura es la siguiente:

$$\frac{dP_s}{dT} = \frac{6,98 \cdot 10^3 \ln\left(\frac{6,98 \cdot 10^3}{760}\right)}{298,15 - 231} = 230,50 \text{ (mm Hg/K)}$$

$$\text{caudal } Q_M = 0,140 \cdot (3,94 \cdot 10^{-1})^2 \cdot 230,50 \sqrt{\frac{298,15}{1,58 \cdot 10^{-1}}} = 217,61 \text{ (libras / minuto)}$$

que en unidades internacionales es:

$$Q_M = 1,35 \text{ kg/s}$$



Para determinar ahora el caudal másico del derrame de vapor, lo primero que debe hacerse es determinar si el flujo es obstruido o no. Para ello, basta con aplicar lo descrito en la ecuación [5.10] del capítulo anterior.

$$P \geq 1 \cdot 10^5 \left( \frac{1,13 + 1}{2} \right)^{\frac{1,13}{1,13-1}} = 172874,6 \text{ Pa}$$

dado que en interior del tanque hay una presión idéntica a la presión de vapor del propano ( $9,3 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ), la cual es superior al valor obtenido aplicando la ecuación [5.10], el flujo será obstruido, y se utilizarán las ecuaciones siguientes ecuaciones [6.17], [6.18], [6.19], [6.20] y [6.21]:

$$T^* = \left[ \frac{1}{231} - \frac{8314}{4,3 \cdot 10^5 \cdot 44} \ln \left( \frac{9,3 \cdot 10^5}{101325 \cdot 1 \cdot 10^5} \right) \right]^{-1} = 118,85 \text{ K}$$

para determinar el valor de  $C_p$ , basta con utilizar la *igualdad de Mayer* y la definición de  $\gamma$ :

$$\left. \begin{array}{l} 8314 = C_p - C_v \\ 1,13 = \frac{C_p}{C_v} \end{array} \right\} \rightarrow C_p = 9121,18 \text{ J/(K} \cdot \text{kg)}$$

la fracción másica del vapor será:

$$F^* = 1 + \frac{118,85}{44 \cdot 4,3 \cdot 10^5} \left[ 44 \cdot 9121,18 \cdot \ln \left( \frac{298,15}{118,84} \right) - 8314 \cdot \ln \left( \frac{172874,6}{9,3 \cdot 10^5} \right) \right] = 3,41$$

y el cambio de entalpía:

$$\Delta H^* = 9121,18 (298,15 - 118,84) + 4,3 \cdot 10^5 (1 - 3,41) = 2675011,2 \text{ J/kg}$$

$$\rho^* = \left[ 3,41 \left( \frac{8314 \cdot 118,85}{44 \cdot 9,3 \cdot 10^5} \right) + \left( \frac{1 - 3,41}{490} \right) \right]^{-1} = 12,93 \text{ kg/m}^3$$

$$Q_M = 7,85 \cdot 10^{-5} \cdot 12,93 \sqrt{2 \cdot 0,85 \cdot 12,93} = 1,03 \text{ kg/s}$$

donde  $Q_M$  es el valor inicial del caudal másico del vapor derramado, pues conforme se escapa vapor del depósito, se produce una evaporación del propano licuado en el interior del tanque como consecuencia del descenso de presión. Este descenso de vapor va acompañado también de un considerable descenso de la temperatura del gas licuado; factores todos estos que influyen en el valor final de  $Q_M$ .

Para diferentes temperaturas, se obtienen los siguientes valores de  $Q_M$ , tal como se indica en la Tabla [6.1]:

$T_s$ [K]	$T^*$ [K]	$F^*$	$\Delta H^*$ [J/kg}	$\rho^*$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$Q_M$ [kg/s]
298,15	118,85	3,41	600600,74	12,93	1,03
273,15	118,85	3,19	467507,75	13,80	0,97
250,15	118,85	2,96	353074,19	14,80	0,90
225,15	118,85	2,70	239188,73	16,21	0,81
200,15	118,85	2,40	138751,87	18,14	0,69
175,15	118,85	2,07	55361,26	20,97	0,50

Tabla 6.1. Valores de  $Q_M$  a diferentes temperaturas.

## Supuesto práctico nº 2

La mayoría de derrames de líquidos presurizados proceden de gases licuados cuyos recipientes que los contienen son sometidos a un aumento de temperatura. Ello provoca un incremento de la presión en el interior del depósito y pueden entrar en funcionamiento los dispositivos de alivio de presión (válvulas de alivio y discos de ruptura) los cuales originan el escape.

El programa informático APPO aporta para esta circunstancia, las siguientes ventajas:

- No hay que recurrir a hojas de cálculo para determinar la evolución de los diferentes parámetros de la bombona en función del tiempo.
- Da la información global de todo el proceso: evaporación "flash", influencia de la temperatura y tipo de suelo, radiación solar y velocidad del viento.
- Mayor rapidez de cálculo.
- Más seguridad en las operaciones matemáticas (no equivocaciones).
- Aporta las constantes físico-químicas de la materia peligrosa implicada en el accidente que son necesarias para realizar los cálculos.
- Los resultados junto con los "datos de inicio" aparecen todos en una misma pantalla: toda la información en un único campo visual.
- Permite enlazar los resultados a posibles nuevas situaciones: área del derrame, incendio, explosión, etc.

Calcular el caudal de emisión del derrame de propano licuado contenido en una botella de 1,5 m de altura y 30 cm de diámetro. La presión de almacenamiento es la presión de vapor del propano a la temperatura de 25 °C ..

Diámetro del depósito:	0,3 m
Longitud del depósito:	1,5 m
Contenido:	106 litros de propano licuado (14 kg)
Coefficiente de descarga:	$C_d = 0,85$

Densidad del propano licuado:  $\rho_\lambda = 490 \text{ kg/m}^3$

Presión de vapor del propano a 25 °C:  $P_s = 9,3 \text{ bar} = 9,18 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

Punto de ebullición:  $T_b = 231 \text{ K}$

Calor de vaporización a  $T_b$   $\lambda = 4,3 \cdot 10^5 \text{ J/kg}$

Propano  $\gamma = 1,13$

Propano (PM) = 44

El Esquema 6.1 muestra la pantalla de entrada y salida de datos del modelo APPO para la simulación de un derrame de propano licuado contenido en una botella de 1,5 m de altura y 30 cm de diámetro.

**SAPPO**  
 Archivo Consultas Emergencias NTP Recursos ?

**PROpano** **Nº ONU: 1978** **FICHA DE SEGURIDAD**

**Datos del Depósito**

Volumen [litros] 106

Cuadrado

Cilíndrico horizontal

Cilíndrico vertical

Esférico

Altura 1,5 [metros]

Lado 1 [metros]

Lado 2 [metros]

Radio 0,15 [metros]

Masa 14 [kg]

Temperatura 25 [°C]

Presión 9,178 [atm]

Diámetro orificio 0,2 [cm]

Cd 0,85

**Tabla de Datos:**

Tiempo [s]	Tipo de flujo	Presión int [Pa]	Temp int [K]	Temp int [°C]	Densidad [kg/m³]	Caudal masico [kg/s]	Velocidad fuga [m/s]
0	Sonico	930000	298	24,99	132,039	0,001256625	432,11
10	Sonico	930000	296	22,8	127,188	0,00120673	432,11
20	Sonico	930000	294	20,8	122,492	0,0011592	432,11
30	Sonico	930000	293	19,8	118,002	0,00111388	432,11
40	Sonico	930000	291	17,8	113,709	0,00107065	432,11
50	Sonico	930000	290	16,8	109,603	0,00102941	432,11
60	Sonico	930000	289	15,8	105,674	0,00099004	432,11
70	Sonico	930000	287	13,8	101,912	0,00095245	432,11
80	Sonico	930000	286	12,8	98,311	0,00091655	432,11
90	Sonico	930000	284	10,8	94,862	0,00088224	432,11
100	Sonico	930000	283	9,8	91,557	0,00084946	432,11

Tiempo estimado de derrame 24,5 [minutos] **EXPORTAR**

**Gráfico:** Presión interior [Pa] vs. tiempo [segundos].

Legend:

- Presión interior [Pa]
- Temperatura interior [°C]
- Caudal masico [kg/s]
- Velocidad [m/s]
- Masa interior [kg]
- Longitud flama [m]
- Potencia radiacion emitida [J/s]

Buttons: CALCULAR, OTRO CALCULO, INFORME, SALIR

**Esquema 6.1.** Pantalla de entrada y salida de datos del modelo APPO para la simulación de un derrame de propano licuado contenido en una botella de 1,5 m de altura y 30 cm de diámetro.

Mientras se va “derramando gas”, en el interior del recipiente la fase líquida se va evaporando y manteniendo constante la presión (presión de vapor).

Por otro lado, al ser el flujo de salida de la fase gas obstruido, la velocidad de salida será constante hasta que las condiciones pasen a ser subsónicas.

El Esquema 6.2 muestra la pantalla de entrada y salida de datos del modelo APPO para la simulación de un derrame de propano licuado contenido en un cilindro horizontal.

**PROPRANO** **Nº ONU: 1978** **FICHA DE SEGURIDAD**

**Datos del Depósito**

- Volumen [litros] 106
- Cuadrado
- Cilíndrico horizontal
- Cilíndrico vertical
- Esférico

Altura 1,5 [metros]  
Lado 1 [metros]  
Lado 2 [metros]  
Radio 0,15 [metros]  
Masa 14 [kg]

Temperatura 25 [°C]  
Presión 9,178 [atm]  
Diámetro orificio 0,2 [cm]  
Cd 0,85

Tiempo [s]	Tipo de flujo	Presión int [Pa]	Temp int [K]	Temp int [°C]	Densidad [kg/m³]	Caudal masico [kg/s]	Velocidad fuga [m/s]
0	Sonico	930000	298	24,99	132,039	0,001256625	432,11
10	Sonico	930000	296	22,8	127,188	0,00120673	432,11
20	Sonico	930000	294	20,8	122,492	0,0011592	432,11
30	Sonico	930000	293	19,8	118,002	0,00111388	432,11
40	Sonico	930000	291	17,8	113,709	0,00107065	432,11
50	Sonico	930000	290	16,8	109,603	0,00102941	432,11
60	Sonico	930000	289	15,8	105,674	0,00099004	432,11
70	Sonico	930000	287	13,8	101,912	0,00095245	432,11
80	Sonico	930000	286	12,8	98,311	0,00091655	432,11
90	Sonico	930000	284	10,8	94,862	0,00088224	432,11
100	Sonico	930000	283	9,8	91,557	0,00084946	432,11

Tiempo estimado de derrame 24,5 [minutos] **EXPORTAR**

Gráfico: Velocidad [m/s] vs tiempo [segundos].

Legend:

- Presión interior [Pa]
- Temperatura interior [°C]
- Caudal masico [kg/s]
- Velocidad [m/s]
- Masa interior [kg]
- Longitud flama [m]
- Potencia radiación emitida [J/s]

Buttons: CALCULAR, OTRO CALCULO, INFORME

**Esquema 6.2.** Pantalla de entrada y salida de datos del modelo APPO para la simulación de un derrame de propano licuado contenido en un cilindro horizontal

Esto queda reflejado en una tabla de datos que puede ser exportada a la hoja de cálculo Excel y realizar cálculos suplementarios.

También puede obtenerse información de la cantidad de propano que hay en el interior del recipiente en función del tiempo. El Esquema 6.3 muestra la pantalla de entrada y salida de datos del modelo APPO para la simulación de la cantidad de propano que queda en el interior del tanque en función del tiempo.

**SAPPO**  
 Archivo Consultas Emergencias NTP Recursos ?

**PROPANO** **Nº ONU: 1978** **FICHA DE SEGURIDAD**

**Datos del Depósito**

Volumen [litros] 106

Cuadrado

Cilíndrico horizontal

Cilíndrico vertical

Esférico

Altura 1,5 [metros]

Lado 1 [metros]

Lado 2 [metros]

Radio 0,15 [metros]

Masa 14 [kg]

Temperatura 25 [°C]

Presión 9,178 [atm]

Diámetro orificio 0,2 [cm]

Cd 0,85

CALCULAR

OTRO CALCULO

INFORME

Tiempo [s]	Tipo de flujo	Presión int [Pa]	Temp int [K]	Temp int [°C]	Densidad [kg/m³]	Caudal masico [kg/s]	Velocidad fuga [m/s]
0	Sonico	930000	298	24,99	132,039	0,001256625	432,11
10	Sonico	930000	296	22,8	127,188	0,00120673	432,11
20	Sonico	930000	294	20,8	122,492	0,0011592	432,11
30	Sonico	930000	293	19,8	118,002	0,00111388	432,11
40	Sonico	930000	291	17,8	113,709	0,00107065	432,11
50	Sonico	930000	290	16,8	109,603	0,00102941	432,11
60	Sonico	930000	289	15,8	105,674	0,00099004	432,11
70	Sonico	930000	287	13,8	101,912	0,00095245	432,11
80	Sonico	930000	286	12,8	98,311	0,00091655	432,11
90	Sonico	930000	284	10,8	94,862	0,00088224	432,11
100	Sonico	930000	283	9,8	91,557	0,00084946	432,11

Tiempo estimado de derrame 24,5 [minutos] **EXPORTAR**

Gráfico: Masa interior [kg] vs tiempo [segundos]

Presión interior [Pa]

Temperatura interior [°C]

Caudal masico [kg/s]

Velocidad [m/s]

**Masa interior [kg]**

Longitud llama [m]

Potencia radiación emitida [J/s]

**El Esquema 6.3.** Pantalla de entrada y salida de datos del modelo APPO para la simulación de la cantidad de propano que queda en el interior del tanque en función del tiempo.

**Evaporación  
de líquidos inflamables  
y gases licuados derramados.**

CAPITULO









## 7.1 Introducción

Se denomina líquidos inflamables a aquellos líquidos, mezclas de estos o líquidos que contienen sustancias sólidas en disolución o suspensión (por ejemplo pinturas, barnices, lacas, etc., siempre que no se trate de sustancias incluidas en otras clases debido a sus características peligrosas) que **desprenden vapores** inflamables a una temperatura no superior a los 100 °C.

Desde el punto de vista del riesgo que presentan en base a su punto de inflamación, y atendiendo a su número de identificación de peligro según el ADR (Acuerdo europeo sobre transporte internacional de mercancías peligrosas por carretera), los líquidos inflamables se clasifican en:

**Líquidos muy inflamables** (nº de peligro 33).- su punto de inflamación se encuentra por debajo de 21 °C.

**Líquidos inflamables** (nº de peligro 30).- su punto de inflamación se encuentra situado entre 21 °C y 100 °C.

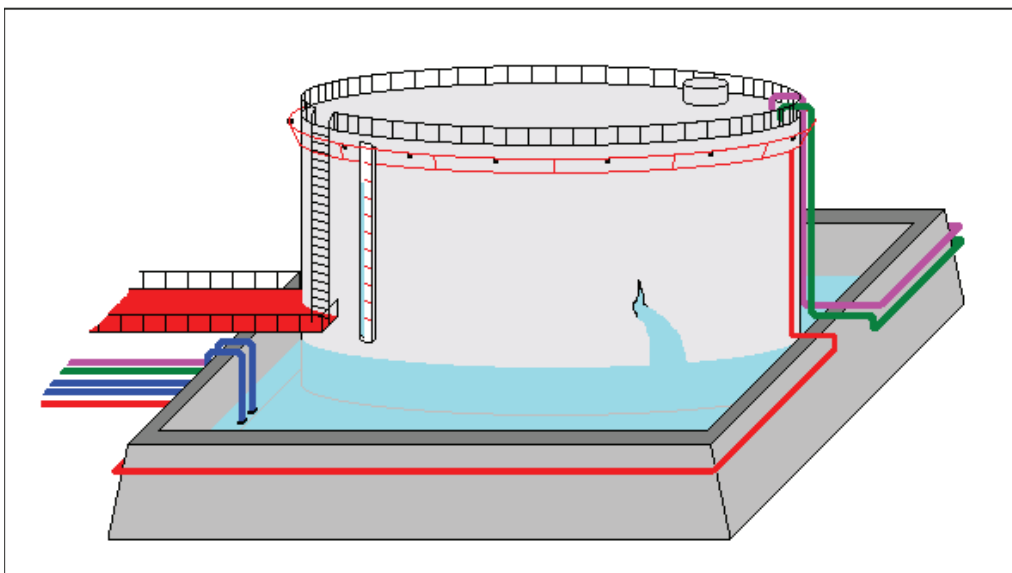
Existe también un cierto número de líquidos inflamables que presenta además otros riesgos asociados como el de ser tóxicos en mayor o menor medida (metanol, acroleína, etc. e hidrocarburos aromáticos tales como el benceno, tolueno, xileno, etc.), poseer



cierto grado de corrosividad (metilamina, dietilamina, etc.) o presentar una reactividad especialmente violenta (acetato de vinilo, metacrilato de etilo, estireno, etc.).

Tales productos, en la mayoría de los casos derivados del petróleo (gasolinas, disolventes, etc.), se encuentran almacenados generalmente en depósitos aéreos confinados en sistemas de contención (cubetos, etc.) cuyas dimensiones son conocidas y están perfectamente delimitadas (Instrucción Técnica Complementaria MIE-APQ-001) tal como se puede observar en la Figura 7.1. Sólo en determinadas circunstancias, los derrames se producen fuera de tales situaciones (transporte por carretera, etc.), causando a las unidades de intervención de emergencias cierta incertidumbre a la hora de coordinar los efectivos de que disponen y gran dificultad en la toma de decisiones, ya que:

- se desconoce el tiempo que puede tardar en evaporarse el fluido derramado (gases tóxicos e inflamables, etc.)
- no se sabe qué porción de terreno o área cubrirá el derrame (evacuación y acordonamiento de la zona afectada, contaminación del medio-ambiente, etc.)



**Figura 7.1.** Depósito de líquidos inflamables con de cubeto decontención.



## 7.2 Estimación del área de un derrame

La estimación del área que ocupará el derrame de un líquido inflamable, parámetro ***indispensable*** para determinar los tiempos y las velocidades de evaporación del mismo, es una de las tareas más difíciles de realizar cuando uno se encuentra en el escenario del accidente, pues son muchas las variables que influyen en el proceso:

- confinamiento de la zona
- inclinación e irregularidades del terreno
- permeabilidad y material del suelo
- propiedades fisico-químicas del fluido (tensión superficial, viscosidad, etc.)
- viento y radiación solar
- etc.

Los estudios realizados sobre el tema no son muchos y además complejos. De hecho, es habitual en la bibliografía y en los simuladores informáticos utilizar la fórmula propuesta por el Handbook of Chemical Hazard Analysis Procedures la cual aporta (evidentemente con un considerable error) el valor teórico de la superficie que ocuparía un derrame de un líquido inflamable en condiciones de idealidad:



$$\log(A) = 0,492 \log(m) + 1,617 \quad [7.1]$$

$$A = 10^{0,492 \log(m) + 1,617} \quad [7.1 \text{ bis}]$$

donde:      A:      área del derrame (pies<sup>2</sup>)  
              m:      masa total de líquido derramado (libras)



### 7.3 Evaporación de líquidos derramados

La evaporación de los fluidos derramados depende, en gran medida, de su volatilidad, de su punto de ebullición, de la temperatura de almacenamiento y de la superficie que ocupa el líquido derramado. Los procesos involucrados en el aporte de energía al líquido derramado para que se evapore son los siguientes:

- $Q_{cal}$  - Transferencia de calor (del suelo por conducción y del aire por convección)
- $Q_{mas}$  - Transferencia de masa
- $Q_{sol}$  - Radiación solar

#### Transferencia de calor

La cantidad de calor o energía transferida o aportada por el sistema (suelo y/o aire) al fluido derramado se evalúa utilizando la ecuación de transmisión de calor unidireccional aplicada a cada uno de los medios involucrados, resultando por consiguiente una expresión compuesta de dos sumandos; el primero que afecta al suelo y el segundo al aire:



$$Q_{\text{cal}} = \frac{D_C k_S A (T_S - T_B)}{\rho \Delta H_V \sqrt{\pi \alpha_S t}} + \frac{k_a h A}{\Delta H_V k_a} (T_S - T_B) \quad [7.2]$$

- donde:
- $Q_{\text{cal}}$ : energía aportada por transferencia de calor (W)
  - $D_C$ : factor de congelación (ver anexo VI)
  - $k_S$ : conductividad térmica del suelo (W/mK)
  - $A$ : área del derrame o charco ( $\text{m}^2$ )
  - $T_S$ : temperatura del suelo (K)
  - $T_B$ : punto de ebullición del fluido (K)
  - $\rho$ : factor de percolación (ver anexo VI)
  - $\Delta H_V$ : calor latente de vaporización (J/kg)
  - $\alpha_S$ : difusividad térmica del suelo ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) =  $k/\rho c_p$
  - $t$ : tiempo transcurrido después del derrame (s)
  - $k_a$ : conductividad térmica del aire (W/mK)
  - $h$ : coeficiente de transferencia de calor por convección (K/W)

en cuyo segundo sumando se encuentra implicado en cierto modo el número de Nusselt:

$$\text{Nu} = \frac{hL}{k_a}$$

Dependiendo del grado de volatilidad del líquido derramado, la velocidad de evaporación estará gobernada bien por la cantidad de calor cedida del suelo por conducción (líquidos muy volátiles), o por la cantidad de calor cedida de la atmósfera por convección (líquidos volátiles). Ante tales situaciones, no resulta extraño observar en la bibliografía la ecuación [7.2] simplificada a un único sumando, sobre todo en el caso de los líquidos muy volátiles a los que se les aplica los llamados "modelos de conducción en suelos":



$$Q_{\text{cal}} = \frac{k_s A (T_s - T_B)}{\sqrt{\pi \alpha_s t}} \quad [7.2\text{bis}]$$

### Transferencia de masa

La transferencia de masa puede determinarse utilizando la ecuación propuesta por el paquete informático CHARM (Emergency Response System de la empresa Radian Corporation):

$$Q_{\text{mas}} = \alpha_{f-a} \text{Sh}_L \rho_G \left( \frac{A}{L} \right) \quad [7.3]$$

- donde:
- $Q_{\text{mas}}$ : energía aportada por transferencia de masa (W)
  - $\alpha_{f-a}$ : coeficiente de difusión térmica entre fluido-aire ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
  - $\text{Sh}_L$ : número de Sherwood =  $kL/D_m$
  - $D_m$ : difusividad molar ( $\text{mol}\cdot\text{kg}/\text{mh}$ )
  - $k$ : coeficiente de transferencia de materia ( $\text{mol}\cdot\text{kg}/\text{m}^2\text{h}$ )
  - $\rho_G$ : densidad del fluido en estado gaseoso ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
  - $A$ : área del derrame o charco ( $\text{m}^2$ )
  - $L$ : dimensión lineal del derrame (m)

### radiación solar

La radiación que llega a la superficie terrestre lo hace en forma de radiación directa y/o difusa, dependiendo de los factores atmosféricos, polución, etc. Considerando en nuestro caso que se trata de un intercambio directo entre las superficies Sol-Tierra, la transferencia de radiación solar es directamente proporcional (constante solar  $S_{\text{rad}}$ ) a la superficie que ocupa el derrame, y viene dada por la siguiente ecuación:



$$Q_{\text{sol}} = S_{\text{rad}} \cdot A \quad [7.4]$$

donde:  $Q_{\text{sol}}$ : energía aportada por radiación solar (W)  
 $S_{\text{rad}}$ : radiación solar ( $\text{W}/\text{m}^2$ )  
A: área del derrame o charco ( $\text{m}^2$ )

El valor de la constante solar ( $S_{\text{rad}}$ ) es diferente según la época del año, debido a la variación de la distancia que hay entre la Tierra y el Sol, por lo que en muchas ocasiones se suele usar su valor promedio ( $1353 \text{ W}/\text{m}^2$ ).





## 7.4 Flujo de evaporación de líquidos inflamables derramados

El estudio del flujo de evaporación de un líquido inflamable que se ha derramado se obtiene planteando y desarrollando la suma de todos los factores ya descritos en el punto 7.3 – *Evaporación de líquidos derramados*, que aportan al fluido la energía suficiente para que se evapore ( $Q_{cal} + Q_{mas} + Q_{sol}$ ). Todas estas operaciones no son del todo sencillas, y además no resulta fácil disponer en un momento dado de todas las variables del sistema (difusividad y conductividad térmica del aire y del terreno, porosidad del terreno, etc.). Por ello, Fleisher (1980) desarrolló un modelo en el que si el diámetro del derrame se mantenía constante y no existía aportación alguna de masa al mismo, bastaba con considerar el valor máximo de la transferencia de calor o de masa, para determinar el tiempo de evaporación de un derrame:

$$Q_{Evap} = \max(Q_{cal}, Q_{mas}) + Q_{sol}$$

Para el caso concreto de líquidos volátiles derramados que se encuentran a una temperatura  $T$  próxima a la ambiente, la velocidad de evaporación, al contrario que para líquidos muy volátiles, depende en gran medida de la cantidad de energía recibida por convección de la atmósfera (viento, etc.) y de la radiación solar. Los Laboratorios de ingeniería y servicios de las fuerzas aéreas de los EE UU desarrollaron un modelo simplificado (Kahler J.P. 1980) que fue contrastado con un complejo modelo numérico



(Ille, G 1978) y validado con resultados experimentales (Clewel, H.J. 1.983) por las mismas fuerzas aéreas, el cual propone para calcular el flujo de evaporación  $E_{\text{vap}}$  del líquido derramado, a temperaturas superiores o iguales a los 0 °C, la siguiente expresión:

$$E_{\text{vap}} = 4,66 \cdot 10^{-6} U_V^{0,75} (1 + 4,3 \cdot 10^{-3} T_L^2) \frac{P_V (\text{PM})}{P_{\text{hd}}} \quad [7.5]$$

donde:

- $E_{\text{vap}}$ : flujo o tasa de evaporación (libras/minuto·pie<sup>2</sup>)
- $U_V$ : velocidad del viento (millas/h)
- $P_V$ : presión de vapor del líquido derramado (mm de Hg)
- $P_{\text{hd}}$ : presión de vapor de la hidracina (mm Hg)
- $T_L$ : temperatura del líquido derramado (°C)
- (PM) masa molecular del líquido derramado

en el que la presión de vapor de la hidracina ( $P_{\text{hd}}$ ) se determina resolviendo la siguiente ecuación:

$$\ln P_{\text{hd}} = 65,3319 - \frac{7245,2}{T_L} - 8,22 \ln T_L + 6,1557 \cdot 10^{-3} T_L \quad [7.6]$$

donde en este caso  $T_L$  debe estar en grados Kelvin y  $P_{\text{hd}}$  en atmósferas.

De una forma paralela, Kumar A. y Patel I. propusieron las siguientes ecuaciones, muy similares a las anteriores, y usando unidades internacionales:

$$E_{\text{vap}} = 6,94 \cdot 10^{-7} U_V^{0,75} \left[ 1 + 4,3 \cdot 10^{-3} (T - 273,15)^2 \right] \frac{P_V (\text{PM})}{P_{\text{hd}}} \quad [7.5 \text{ bis}]$$



donde ahora  $P_{hd}$  viene dada por la siguiente expresión:

$$P_{hd} = \exp \left[ 76,8580 - \frac{7245,2}{T_L} - 8,22 \ln T_L + 6,1557 \cdot 10^{-3} T_L \right] \quad [7.6 \text{ bis}]$$

donde

- $E_{vap}$ : flujo o tasa de evaporación ( $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ )
- $T$ : temperatura ambiente (K)
- $T_L$ : temperatura del líquido derramado (K)
- $P_v$ : presión de vapor del líquido derramado (Pa)
- $P_{hd}$ : presión de vapor de la hidracina (Pa)

También Sutton (NTP 430) propuso una fórmula válida para líquidos cuya presión parcial de vapor es igual o menor que  $2 \cdot 10^4$  Pa en condiciones de estabilidad atmosférica neutra.

Para superficies circulares y cuadradas las ecuaciones son las siguientes:

$$\text{superficie circular : } E_{vap} = 2 \cdot 10^{-3} u_{10}^{0,78} r^{-0,11} \frac{(PM) P_t}{R T} \ln \left[ 1 + \frac{P_{vs} - P_{vair}}{P_t - P_{vs}} \right] \quad [7.7]$$

$$\text{superficie cuadrada : } E_{vap} = 2 \cdot 10^{-3} u_{10}^{0,78} L^{-0,11} \frac{(PM) P_t}{R T} \ln \left[ 1 + \frac{P_{vs} - P_{vair}}{P_t - P_{vs}} \right] \quad [7.8]$$

$E_{vap}$ : flujo o tasa de evaporación ( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ )

$u_{10}$ : velocidad del viento a 10 m de altura (m/s)

$r$ : radio del charco circular (m)

$L$ : longitud del lado del charco cuadrado (m)



- (PM): masa molecular  
 $P_t$ : presión total (Pa)  
 $P_{vs}$ : presión de vapor del compuesto que se evapora, sobre la superficie del líquido (Pa)  
 $P_{vair}$ : presión de vapor del compuesto que se evapora, en los alrededores (Pa)  
R: constante de los gases 8310 (J/kmol·K)  
T: temperatura absoluta de la superficie del líquido (K)

Evidentemente la velocidad de vaporización total del fluido derramado ( $v_{vap}$ ) se obtiene multiplicando el flujo de evaporación  $E_{vap}$  por el área del derrame. La estimación del tiempo que tarda en evaporarse el fluido derramado se obtiene dividiendo la masa total de líquido derramada por la velocidad media de vaporización total.

$$V_{vap} = A E_{vap}$$

- donde:  $v_{vap}$ : velocidad media de vaporización total (libras/minuto)  
 $E_{vap}$ : flujo de evaporación (libras/minuto·pie<sup>2</sup>)  
A: área del derrame o charco (pie<sup>2</sup>)

El tiempo que tardará en vaporizarse todo el fluido resultará de dividir la masa de líquido derramado por la velocidad media de vaporización:

$$t_{vap} = \frac{\text{masa (libras)}}{v_{vap} \text{ (libras/minuto)}} = \text{minutos}$$

Por otro lado, un documento de la EPA titulado "Guía técnica de materias peligrosas – Planes de emergencia para materias peligrosas" U.S. Environmental Protection Agency. Federal Emergency Management Agency. And U.S. Department of Transportation,



appendix G (diciembre 1987), usado también por el paquete informático EPI (Emergency Prediction Information), propone la siguiente ecuación:

$$v_{\text{vap}} = \frac{0,0139 U_v^{0,78} (PM)^{0,67} A P_v(T)}{T + 273} \quad [7.9]$$

donde:

- $v_{\text{vap}}$ : velocidad de evaporación (libras/minuto)
- (PM): masa molecular
- $U_v$ : velocidad del viento (m/s)
- A: área del derrame ( $\text{m}^2$ )
- T: temperatura del líquido derramado ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $P_v(T)$ : presión vapor del líquido derramado a la temperatura T (mm Hg)





## 7.5 Flujo de vaporización de líquidos muy volátiles derramados

En el caso de líquidos derramados muy volátiles (gases licuados, etc.), la velocidad de evaporación depende en gran medida de la cantidad de calor transmitida del suelo al fluido por conducción. La evaluación del tiempo que tardará en evaporarse un fluido derramado de estas características, implica disponer de una extensa base de datos o tener unos amplios conocimientos del terreno (temperatura, porosidad, composición y sus correspondientes coeficientes de conductividad y difusividad, etc.) implicado.

Por tal motivo, se han desarrollado, y se encuentran en la bibliografía diferentes modelos que sin una excesiva demanda de datos, ofrecen resultados muy similares a los experimentales. Concretamente, el paquete informático ARCHIE (Automated Resource for Chemical Hazard Incident Evaluation) se basa en las siguientes consideraciones:

- Una gran diferencia de temperatura entre el suelo y el punto de ebullición del líquido derramado, conduce generalmente a largos tiempos de vaporización.
- El tiempo que tarda en vaciarse un recipiente que contiene un líquido que hierve a baja temperatura (gases licuados, etc.), es similar al tiempo que tardaría en vaciarse si el líquido estuviera ardiendo (combustión).
- La velocidad de quemado (y por lo tanto el tiempo de quemado) de un líquido es función de su punto de ebullición, de su peso molecular y de su densidad.



A partir de ellas, uno de los modelos simplificados más utilizado hoy en día es el que fue desarrollado por Burgess (1974) a partir del estudio de correlaciones de velocidades de quemado  $v_Q$ , las cuales fueron contrastadas con experimentos reales de diferentes materias peligrosas: butano, dióxido de azufre, propano, metano y oxígeno. La ecuación que propuso es la siguiente:

$$E_{\text{vap}} = (0,5322 - 0,001035 T_b) v_Q \rho \quad [7.10]$$

en la que sustituyendo la variable velocidad de quemado ( $v_Q$ ) por la expresión que la determina (véase la expresión [8.3] del capítulo 8), la ecuación [7.10] queda:

$$E_{\text{vap}} = (0,5322 - 0,001035 T_b) 15,43 e^{-0,0043 T_b} (PM) 10^{-7} \quad [7.11]$$

donde:

- $E_{\text{vap}}$ : flujo de evaporación ( $\text{kg/s}\cdot\text{m}^2$ )
- $T_b$ : punto de ebullición ( $^{\circ}\text{F}$ )
- $\rho$ : densidad del líquido ( $\text{kg/m}^3$ )
- $v_Q$ : velocidad de quemado ( $\text{m/s}$ )
- (PM): masa molecular





## 7.6 NTP 430: Gases licuados, evaporación de fugas y derrames

Esta es la situación que se da en la evaporación de derrames de gases licuados por enfriamiento (refrigerados) que están a su temperatura de ebullición o próximos a ella, y en la evaporación de derrames procedentes de gases licuados a presión después de haber ocurrido la evaporación rápida inicial y quedar un charco de gas licuado a su temperatura de ebullición.

### Evaporación rápida inicial de gases licuados

Al producirse la rotura, pérdida de contención, etc. de un depósito de gas licuado, este sufre un descenso súbito de la presión de almacenamiento hasta alcanzar la presión atmosférica. Ello da lugar a una evaporación muy rápida (flash) que arrastra una cantidad considerable de líquido en forma de aerosol (pequeñas gotas), mientras que el resto de fluido forma un charco en el suelo.

La masa vaporizada puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$m_v = m_0 \left[ 1 - e^{-C_p (T_0 - T_{eb}) / \Delta H_v} \right] \quad [7.12]$$



en donde:  $m_v$ : masa vaporizada en la evaporación rápida (kg)  
 $m_0$ : masa inicial del gas licuado (kg)  
 $C_p$ : calor específico del gas licuado (J/kg·K)  
 $\Delta H_v$ : calor latente de vaporización del gas licuado (J/kg)  
 $T_0$ : temperatura inicial del gas licuado (K)  
 $T_{eb}$ : temperatura de ebullición del gas licuado (K)

Los resultados de esta ecuación [7.12] suelen ser muy inferiores a los observados experimentalmente, debido fundamentalmente al arrastre de líquido en forma de pequeñas gotas (aerosol). Por tal motivo, T. Kletz sugirió considerar el doble del valor teórico obtenido.

### Evaporación de gases licuados en suelo no permeable

Cuando un gas licuado, a su relativamente baja temperatura de ebullición, entra en contacto con un terreno seco a mayor temperatura y que por ser impermeable no penetra en él de una manera significativa, se establece una transferencia de calor del medio de mayor temperatura (suelo) al de menor (masa de gas licuado).

El parámetro que controla mayoritariamente a este fenómeno físico es el correspondiente al flujo de calor  $q_s$  (W/m<sup>2</sup>) transferido por conducción desde el terreno a la masa de gas licuado del charco:

$$q_s = \frac{\lambda_s (T_s - T_{eb})}{(\pi \alpha_s)^{\frac{1}{2}} t^{\frac{1}{2}}} \quad [7.13]$$

en donde:  $q_s$ : flujo de calor (W/m<sup>2</sup>)  
 $\lambda_s$ : conductividad térmica del suelo (W/(m·K))



- $T_s$ : temperatura del suelo (K)  
 $T_{eb}$ : temperatura de ebullición del gas licuado (K)  
 $\alpha_s$ : coeficiente de difusividad del suelo ( $m^2/s$ )  
 $t$ : tiempo transcurrido (s)

El flujo de evaporación ( $E_{vap}$ ) del gas licuado extendido formando un charco sobre un suelo no permeable y en función del tiempo será:

$$E_{vap} = \frac{q_s}{\Delta H_v} = \frac{\lambda_s (T_s - T_{eb})}{\Delta H_v (\pi \alpha_s)^{\frac{1}{2}} t^{\frac{1}{2}}} \quad [7.14]$$

- siendo:  $E_{vap}$ : flujo de evaporación ( $kg/m^2 \cdot s$ )  
 $\Delta H_v$ : calor latente de vaporización del gas licuado (J/kg)

Para la aplicación de la fórmula se necesitan los valores de las constantes de los gases licuados implicados y de los materiales del sustrato que se indican en las Tablas [7.1] y [7.2]:

Gas licuado	Temperatura de ebullición [K]	Calor específico del líquido (temperatura) [ $\times 10^3$ J/kg·K]	Calor latente de vaporiz. del líquido a $T_{eb}$ [ $\times 10^5$ J/kg]
Acetaldehído	293	1,383 (300)	5,7
Amoniaco	240	4,609 (270)	13,7
Butadieno	269	2,347 (300)	4,2
Butano	273	2,514 (300)	3,9
Propano	231	2,640 (260)	4,3
Propileno	226	2,560 (260)	4,4
Butileno	267	2,410 (285)	3,9



Gas licuado	Temperatura de ebullición [K]	Calor específico del líquido (temperatura) [ $\times 10^3$ J/kg·K]	Calor latente de vaporiz. del líquido a $T_{eb}$ [ $\times 10^5$ J/kg]
Cloro	239	0,950 (295)	2,9
Dimetilamina	280	3,100 (295)	5,9
Cloruro de etilo	285	1,760 (295)	3,8
Etano	184	2,490 (203)	4,9
Etileno	170	2,790 (194)	4,9
Oxido de etileno	284	1,990 (295)	5,8
Metano	112	3,770 (139)	5,1
Bromuro de metilo	277	0,838 (295)	2,5
Cloruro de metilo	249	1,580 (268)	4,2
Cloruro de vinilo	259	1,300 (283)	3,7
Dióxido de azufre	263	1,373 (283)	4,0
Bromuro de hidrógeno	204	0,490 (293)	2,1
Cloruro de hidrógeno	188	0,800 (293)	4,3
Fluoruro de hidrógeno	293	3,017 (290)	3,4
Formaldehido	253	3,352 (293)	7,8
Fosgeno	281	1,048 (--)	2,5
Monóxido de carbono	83	1,420 (115)	2,2
Sulfuro de hidrógeno	213	0,545 (--)	5,4
Acetileno	189	2,690 (233)	6,3

Tabla 7.1. Propiedades de los gases licuados a presiones más comunes.

Si el charco de gas licuado formado requiere un tiempo largo para su completa evaporación, el terreno ya no podrá aportar energía calorífica y a partir de un cierto



momento debe tenerse en cuenta la influencia de la radiación solar y la evaporación ocasionada por la convección del aire circundante.

En cuanto a la radiación solar, varía notablemente según la hora del día, la época del año, las condiciones ambientales y la latitud geográfica del lugar. Un valor promedio de la radiación solar es  $q_{rs} = 400 \text{ W/m}^2$  y en la bibliografía especializada se citan valores típicos de radiación solar máxima (a mediodía en días claros), oscilando entre  $425 \text{ W/m}^2$  (enero) y  $1170 \text{ W/m}^2$  (julio) para una latitud de  $45^\circ$  norte.

Para una latitud de  $35^\circ$  norte los valores correspondientes serían  $650 \text{ W/m}^2$  y  $1140 \text{ W/m}^2$ , respectivamente.

Material	Conductividad térmica $\lambda_s$ [W/m·K]	Difusividad $\alpha_s$ [m <sup>2</sup> /s]
Suelo promedio (8 % agua)	0,9	$4,3 \cdot 10^{-7}$
Arena (seca)	0,3	$2,3 \cdot 10^{-7}$
Suelo arenoso (seco)	0,3	$2,0 \cdot 10^{-7}$
Suelo arenoso (8 % agua)	0,6	$3,3 \cdot 10^{-7}$
Madera	0,2	$4,5 \cdot 10^{-7}$
Gravilla	2,5	$11 \cdot 10^{-7}$
Cemento (valor medio)	1,1	$10 \cdot 10^{-7}$
Acero al carbono	45	$127 \cdot 10^{-7}$

Tabla 7.2. Constantes de algunos suelos en donde se ha producido un derrame.

En un derrame que ocurra sobre una superficie aislada térmicamente, el efecto de la radiación solar o de la convección del aire circundante puede ser dominante al cabo de un periodo de tiempo corto.



Se recomienda comparar el valor calculado anteriormente con el que daría el flujo de evaporación de un líquido por convección, el cual tiene una temperatura de ebullición superior a la temperatura ambiente mediante la fórmula de Sutton [7.7] y [7.8] y elegir el valor mayor de los dos.

### **Evaporación de gases licuados refrigerados, derramados en un suelo permeable y seco**

Las expresiones utilizadas para esta situación se basan en los ensayos experimentales realizados con un gas licuado refrigerado, en particular el gas natural licuado, evaporados en un suelo arenoso y seco.

El flujo de evaporación en ( $\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ ) producido por conducción térmica desde el suelo se ajusta a la ecuación experimental:

$$E_{\text{vap}} = 0,95 t^{-1/2} \quad [7.15]$$

Si se utiliza la fórmula de evaporación de un gas licuado derramado en suelo no permeable, tomando como estándar el gas natural:

- $E_{\text{vap}}$ : ( $\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ )
- $\lambda$ :  $0,3 \text{ W} / (\text{m}\cdot\text{K})$  [tabla 7.2]
- $T_s$ :  $293 \text{ K}$
- $T_{\text{eb}}$ :  $112 \text{ K}$  [tabla 7.1]
- $\Delta H_v$ :  $5,1 \cdot 10^5 \text{ J/kg}$  [tabla 7.1]
- $\alpha_s$ :  $2,3 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  [tabla 7.2]



el flujo de evaporación teórico de un líquido derramado en un suelo no permeable será:

$$E_{\text{vap}} = 0,125 t^{-1/2} \quad [7.16]$$

Estableciendo la razón entre el valor experimental y el correspondiente a un suelo no permeable se tiene:

$$\frac{0,95 t^{\frac{1}{2}}}{0,125 t^{\frac{1}{2}}} = 7,6 \cong 8$$

Esto indica que el flujo de evaporación calculado teóricamente es unas ocho veces menor que el determinado experimentalmente. La explicación a esta diferencia puede hacerse por la influencia de la penetración del líquido en el suelo. Según los datos experimentales observados, la fórmula empírica también se puede aplicar al propano y butano derramado sobre suelo arenoso y seco.

De todo lo razonado, para el flujo de evaporación de un gas licuado, derramado sobre un suelo permeable y seco y en función del tiempo, se puede aplicar la expresión siguiente:

$$E_{\text{vap}} = \frac{8 \lambda_s (T_s - T_{\text{eb}})}{\Delta H_v (\pi \alpha_s)^{\frac{1}{2}}} t^{-\frac{1}{2}} \quad [7.17]$$







## 7.7 Tiempos de vaporización

En base al modelo de la U.S. Air Force Engineering and Service Laboratory, la velocidad media de vaporización de un derrame o charco  $Q_{vap}$ , viene dada por el producto entre el área del fluido derramado, y el flujo de evaporación  $E_v$ .

$$V_{vap} = A \cdot E_v$$

donde:  $V_{vap}$ : velocidad media de vaporización total (libras/minuto)  
 $A$ : área del derrame o charco ( $pie^2$ )  
 $E_{vap}$ : flujo de vaporización (libras/minuto· $pie^2$ )

que dividida por la densidad del vapor  $\rho_v$  da el volumen de fluido emitido por unidad de tiempo  $V_T$ , tal como se indica en la siguiente expresión:

$$V_T = \frac{V_{vap}}{\rho_v} = \frac{V_{vap}}{(PM)} \frac{RT}{P_{atm}} \quad [7.18]$$

donde:  $V_{vap}$ : velocidad media de vaporización total (libras/minuto)  
 $V_T$ : volumen de fluido emitido por unidad de tiempo ( $pie^3$ /minuto)



- $\rho_v$ : densidad del vapor (libras/pie<sup>3</sup>)  
 $R$ : 0,0029 (atm·pie<sup>3</sup>/K·mol)  
 $T$ : temperatura (K)  
 $P_{atm}$ : presión atmosférica (atm)

el cual, según el paquete informático CHARM (complex hazardous air release model), puede ser determinado también para derrames de depósitos por la siguiente expresión:

$$V_T = \frac{\pi}{4} D^2 v_e X_G \quad [7.19]$$

- siendo:
- $D$ : diámetro del orificio (pie)
  - $v_e$ : velocidad de salida (pie/minuto)
  - $X_G$ : fracción molar del fluido emitido ( $X_G = 1 - X_W - X_A$ )
  - $X_W$ : fracción molar de vapor de agua en la bocanada de fluido
  - $X_A$ : fracción molar de aire en la bocanada de fluido

El tiempo que tardará en vaporizarse todo el fluido resultará de dividir la masa de líquido derramado por la vaporización:

$$t_{vap} = \frac{\text{masa}}{v_{vap}} \frac{(\text{libras})}{(\text{libras/minuto})} = \frac{\text{masa}}{v_{vap}} (\text{minutos}) \quad [7.20]$$



## 7.8 Cálculos experimentales

Para la aplicación práctica de las fórmulas obtenidas en este capítulo, se ha tomado como referencia las dimensiones de los depósitos de almacenamiento que la Compañía Repsol-Butano tiene ubicados en Alcudia (Mallorca), que a continuación en formato de tabla se indican (Tabla 7.3):

Número depósitos	Tipo de depósito	Contenido	Capacidad (m <sup>3</sup> )
3	Esférico	Gas butano	4.000
3	Cilíndrico horizontal	Mezcla 70% butano 30% propano	115
13	Cilíndrico horizontal	Gas propano	213

Tabla 7.3. Depósitos de gas ubicados en la antigua central eléctrica de Alcudia.



## Supuesto 1 – evaporación de un gas licuado: propano

Parámetros de entrada al modelo

Accidente:	rotura del depósito
Depósito:	cilíndrico horizontal
Capacidad:	213 m <sup>3</sup>
Contenido:	80000 kg de propano gas licuado
Suelo:	cemento
Velocidad del viento:	2 m/s
Conductividad cemento:	1,1 W/(mK)
Difusividad cemento:	10·10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /s
Dimensiones del cubeto:	26 x 5,5 x 2 m <sup>3</sup>
Temperatura de almacenamiento:	20 °C = 293 K
Epoca del año:	invierno

Cuando se rompe el depósito, lo primero que ocurre es que el gas licuado sufre un descenso brusco de la presión de almacenamiento, el cual da lugar a una evaporación muy rápida del producto que arrastra una gran cantidad de líquido en forma de aerosol.

Para el cálculo de la masa que se evapora ( $m_v$ ) en este estadio de flash, basta con aplicar la fórmula [7.12] y recurrir a las tablas de datos fisicoquímicos del propano (Tabla 7.1):

$$C_p: 2640 \text{ (J/kg}\cdot\text{K) a 260 K}$$

$$\Delta H_v: 4,3 \cdot 10^5 \text{ (J/kg)}$$

$$T_{eb}: 231 \text{ (K)}$$

$$m_v = 80000 \left[ 1 - e^{-2640 (293-231) / 430000} \right] = 25326,7 \text{ kg}$$



aunque como valor más real (cálculos de K. Kletz) se deberá tomar el doble del valor teórico obtenido. Así pues:

$$m_v = 2 \cdot 25326,7 = 50653,4 \text{ kg}$$

y la cantidad no evaporada inicialmente ( $m_f$ ) será de  $80000 - 50653,4 = 29346,6 \text{ kg}$  los cuales caerán al cubeto de contención.

Según lo establecido en la ecuación [7.14] el flujo de evaporación por unidad de superficie y en función del tiempo del fluido derramado no evaporado inicialmente que se encuentra en el cubeto de retención será:

$$E_{\text{vap}} = \frac{1,1(293 - 231)}{430000 \sqrt{\pi} 10 \cdot 10^{-7} t^{\frac{1}{2}}} = 0,089 t^{\frac{1}{2}} \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$$

que multiplicado por el área del derrame (en este caso área del cubeto:  $26 \times 5,5 \text{ m}^2$ ) da la velocidad o tasa de evaporación:

$$v_{\text{vap}} = 143 \cdot 0,089 t^{\frac{1}{2}} = 12,73 t^{\frac{1}{2}} \text{ kg/s}$$

Para determinar el tiempo a partir del cual empieza a ser significativo el calor recibido por la radiación solar, hay que empezar calculando el flujo de calor  $q_s$  transferido por conducción desde el terreno a la masa de gas licuado derramado [7.13]:

$$q_s = \frac{1,1(293 - 231)}{\sqrt{\pi} 10 \cdot 10^{-7} t^{\frac{1}{2}}} = 38270 t^{\frac{1}{2}} \text{ W}/\text{m}^2$$



y considerarlo significativo cuando sea como mínimo el 10 % del flujo calorífico recibido del suelo.

Para el invierno  $425 \text{ (W/m}^2\text{)} = 10 \%$  de  $q_{rs} = 10 \%$  de 4250 así pues:

$$q_{rs} = 4250 \text{ (W/m}^2\text{)} = 38270 \text{ t}^{\frac{1}{2}} \quad \therefore \quad t = 86 \text{ s}$$

Al mismo tiempo, resulta recomendable calcular el flujo de evaporación usando las fórmulas de Sutton [7.7] y [7.8] al objeto de poder determinar la importancia que tiene el efecto de la transferencia de calor por convección del aire en el líquido (supuesto con una presión parcial de vapor de  $2 \cdot 10^4 \text{ Pa}$ ). Para ello se considerará que el cubeto es un cuadrado cuyo lado medirá 11,95 m (superficie igual al cubeto real de forma rectangular), que la presión de vapor del compuesto que se evapora en los alrededores es nula y que el límite máximo de presión parcial del vapor es  $2 \cdot 10^4 \text{ Pa}$ :

$$E_{\text{vap}} = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 2_{10}^{0,78} \cdot 11,95^{-0,11} \cdot \frac{44 \cdot 10^5}{8310 \cdot 293} \ln \left[ 1 + \frac{2 \cdot 10^4 - 0}{10^5 - 2 \cdot 10^4} \right] = 0,0010532 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$$

$$v_{\text{vap}} = A \cdot E_{\text{vap}} = 143 \cdot 0,0010532 = 0,15 \text{ kg/s}$$

comparando los valores obtenidos usando las dos fórmulas e igualándolas, se observa que:

$$0,089 \cdot t^{\frac{1}{2}} = 0,0010532 \quad \therefore \quad t = 7140 \text{ s} = 119 \text{ min}$$



es decir, que si el fluido solo estuviera sometido a la transferencia de calor por convección, tardaría unos 119 minutos en llegar a la tasa de evaporación del gas licuado.

Los cálculos en los que solo se tiene en cuenta la absorción de calor del suelo no coinciden con la realidad. Los tiempos de permanencia del gas licuado en el suelo obtenidos son superiores a la realidad. Es por tanto necesario considerar también el efecto de la radiación solar, y si se quisiera ser muy preciso, también la evaporación por calor de convección.

El flujo de evaporación debido a la radiación solar ( $E_{rs}$ ) en invierno es igual a:

$$E_{rs} = \frac{425}{\Delta H_v} = \frac{425}{4,3 \cdot 10^5} = 9,88 \cdot 10^{-4} \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$$

que aplicado a la superficie total del cubeto ( $143 \text{ m}^2$ ) da una tasa de evaporación que corresponde a:

$$v_{vap} = 143 \cdot 9,88 \cdot 10^{-4} = 0,14 \text{ kg/s}$$

La masa total evaporada al cabo de un tiempo  $t$  será:

$$v(t) = AE(t) = \frac{dM(t)}{dt} \quad \therefore \quad M(t) = A \int E(t) dt$$

$$M(t) = 143 \int 0,089 t^{\frac{1}{2}} dt = 12,73 \int t^{\frac{1}{2}} dt = 25,46 t^{\frac{1}{2}}$$



que teniendo en cuenta la influencia de la radiación solar y el calor transferido por convección, se le adicionarán las correspondientes tasas de evaporación multiplicadas por el tiempo transcurrido:

$$M(t) = 25,46t^{\frac{1}{2}} + 0,14t + 0,15t$$

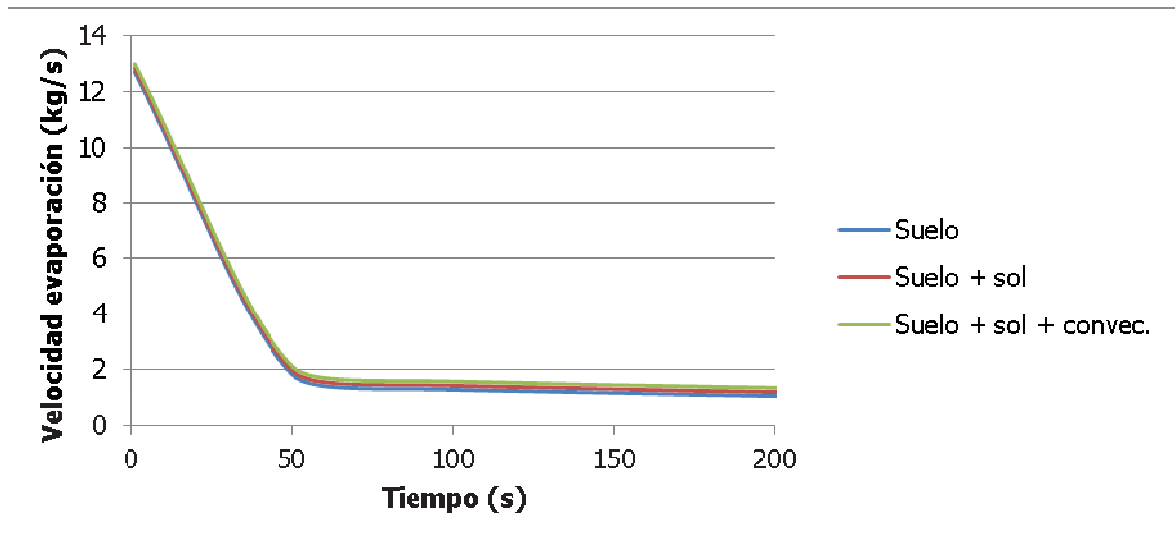
La Tabla [7.4] muestra los valores del flujo de evaporación y de la masa total evaporada en función del tiempo, después del proceso de evaporación "flash".

Tiempo [s]	Tasa evaporación [suelo] [kg/s]	Tasa evaporación [suelo+radiación] [kg/s]	Tasa evaporación [suelo+radiación + convección] [kg/s]	Masa total evaporada [kg]
1	12,72	12,86	13,01	26
50	1,80	1,94	2,09	195
100	1,27	1,41	1,56	284
500	0,57	0,71	0,86	714
1000	0,40	0,54	0,69	1095
5000	0,18	0,32	0,47	3250
10000	0,13	0,27	0,42	5446
50000	0,06	0,20	0,35	20193
96444	0,05	0,18	0,31	29245

Tabla 7.4. Flujos de evaporación y masa total evaporada.

cuya representación se muestra en la Gráfica 7.1



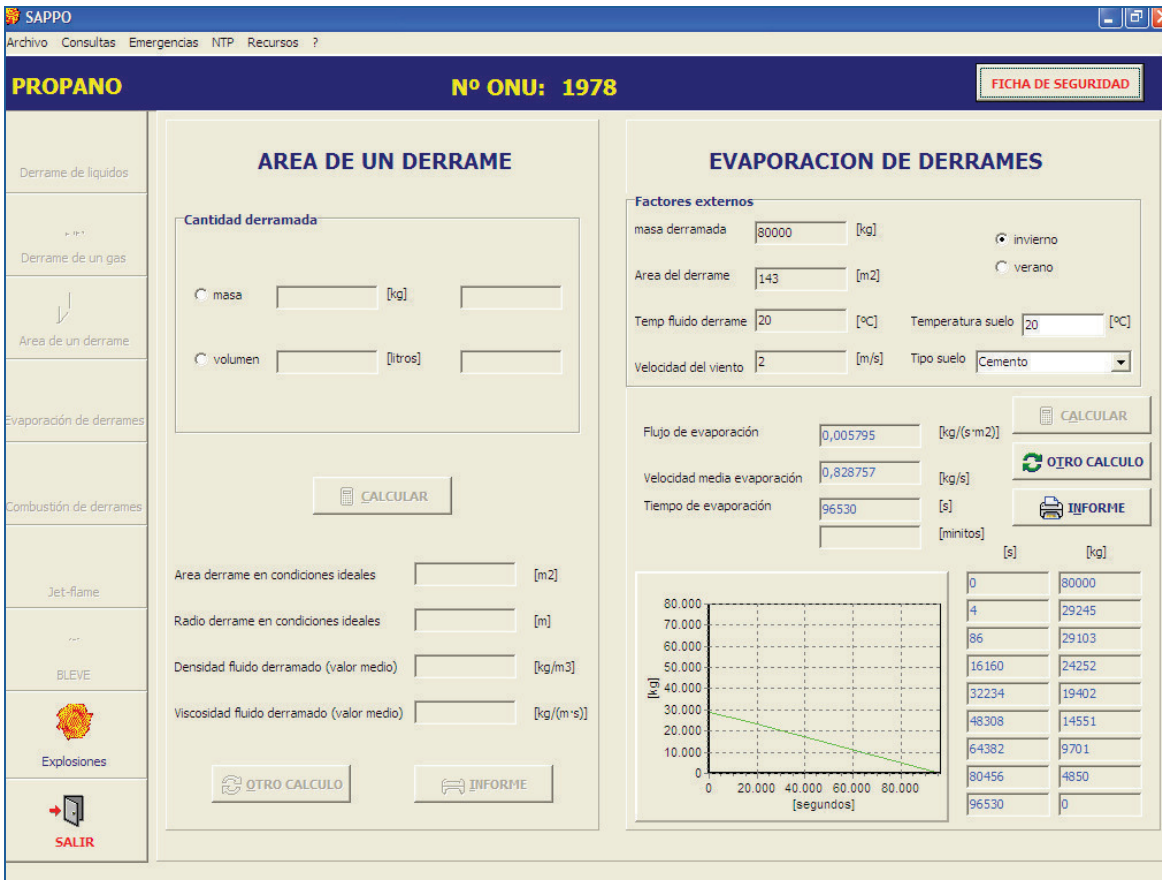


**Gráfica 7.1.** Variación de la velocidad de evaporación con el tiempo

El uso del programa informático APPO para este mismo supuesto, aporta las siguientes ventajas:

- Da la información global de todo el proceso: evaporación "flash", influencia de la temperatura y tipo de suelo, radiación solar y velocidad del viento.
- Mayor rapidez de cálculo.
- Más seguridad en las operaciones matemáticas (no equivocaciones).
- Aporta las constantes físico-químicas de la materia peligrosa implicada en el accidente que son necesarias para realizar los cálculos.
- Los resultados junto con los "datos de inicio" aparecen todos en una misma pantalla: toda la información en un único campo visual.
- Permite enlazar los resultados a posibles nuevas situaciones: área del derrame, incendio, explosión, etc.

El esquema 7.1 muestra la pantalla de entrada y salida de datos de la simulación realizada con el modelo APPO



Esquema 7.1. Pantalla de entrada y salida de datos de la simulación realizada con el modelo APPO

## Supuesto 2 – evaporación de un gas licuado: propano

Los parámetros de partida son los siguientes:

Accidente:	rotura del depósito
Depósito:	cilíndrico horizontal
Capacidad:	213 m <sup>3</sup>
Contenido:	80000 kg de propano gas licuado
Suelo:	arena seca
Velocidad del viento:	2 m/s
Conductividad arena seca:	0,3 W/(mK)
Difusividad arena seca:	2,3·10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /s



Dimensiones del cubeto	26 x 5,5 x 2 m <sup>3</sup>
Temperatura de almacenamiento:	20 °C = 293 K
Epoca del año:	invierno

Al igual que en el supuesto anterior, cuando se rompe el depósito, lo primero que ocurre es que el gas licuado sufre un descenso brusco de la presión de almacenamiento, el cual provoca una evaporación súbita del producto.

Los cálculos son idénticos al supuesto número 1. Así pues, la masa de propano que no se evapora y cae en el interior del cubeto de contención de arena es: 29346,6 kg.

El flujo de evaporación producido por conducción térmica desde el suelo se obtendrá aplicando la ecuación [7.17]:

$$E_{\text{vap}} = \frac{8 \cdot 0,3 \cdot (293 - 231)}{4,3 \cdot 10^5 \sqrt{\pi} 2,3 \cdot 10^{-7}} t^{-\frac{1}{2}} = \frac{148,8}{365,5} t^{-\frac{1}{2}} = 0,407 t^{-\frac{1}{2}} \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$$

y la velocidad o tasa de evaporación  $v_{\text{vap}}$  será:

$$v_{\text{vap}} = 143 \cdot 0,407 t^{-\frac{1}{2}} = 58,201 t^{-\frac{1}{2}} \text{ kg/s}$$

Para determinar el tiempo a partir del cual empieza a ser significativo el calor recibido por la radiación solar, hay que empezar calculando el flujo de calor  $q_s$  transferido por conducción desde el terreno a la masa de gas licuado derramado [7.13]:

$$q_s = \frac{0,3 \cdot (293 - 231)}{\sqrt{\pi} 2,3 \cdot 10^{-7}} t^{-\frac{1}{2}} = \frac{18,6}{8,5 \cdot 10^{-4}} t^{-\frac{1}{2}} = 21882,3 t^{-\frac{1}{2}} \text{ W}/\text{m}^2$$



$$q_{rs} = 4250 \text{ (W/m}^2\text{)} = 21882,3 \text{ t}^{\frac{1}{2}} \quad \therefore \quad t = 2,3 \text{ s}$$

este resultado debe ser comparado con el que proporciona la ecuación de Sutton [7.7] y [7.8] aplicada en la evaporación de líquidos por convección, considerando que el cubeto es de forma cuadrada y que la presión parcial del vapor es de  $2 \cdot 10^4$  Pa.:

$$E_{\text{vap}} = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 2_{10}^{0,78} \cdot 11,95^{-0,11} \cdot \frac{44 \cdot 10^5}{8310 \cdot 293} \ln \left[ 1 + \frac{2 \cdot 10^4 - 0}{10^5 - 2 \cdot 10^4} \right] = 0,0010532 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$$

$$v_{\text{vap}} = A \cdot E_{\text{vap}} = 143 \cdot 0,0010532 = 0,15 \text{ kg/s}$$

la comparación de los dos resultados da un tiempo muy distinto a los 2,3 segundos obtenidos.

$$0,407 \text{ t}^{\frac{1}{2}} = 0,0010532 \quad \therefore \quad t = 149336 \text{ s}$$

El flujo de evaporación ( $E_{\text{vap}}$ ) y la velocidad de evaporación ( $v_{\text{vap}}$ ) debidos a la radiación solar coinciden con los obtenidos en el supuesto número 1, al igual que el calor transferido por convección:

$$E_{rs} = 9,88 \cdot 10^{-4} \text{ kg/(m}^2 \text{ s)}$$

$$v_{\text{vap}} = 0,14 \text{ kg/s}$$

La masa evaporada al cabo de un tiempo  $t$  vendrá dada por la siguiente expresión:

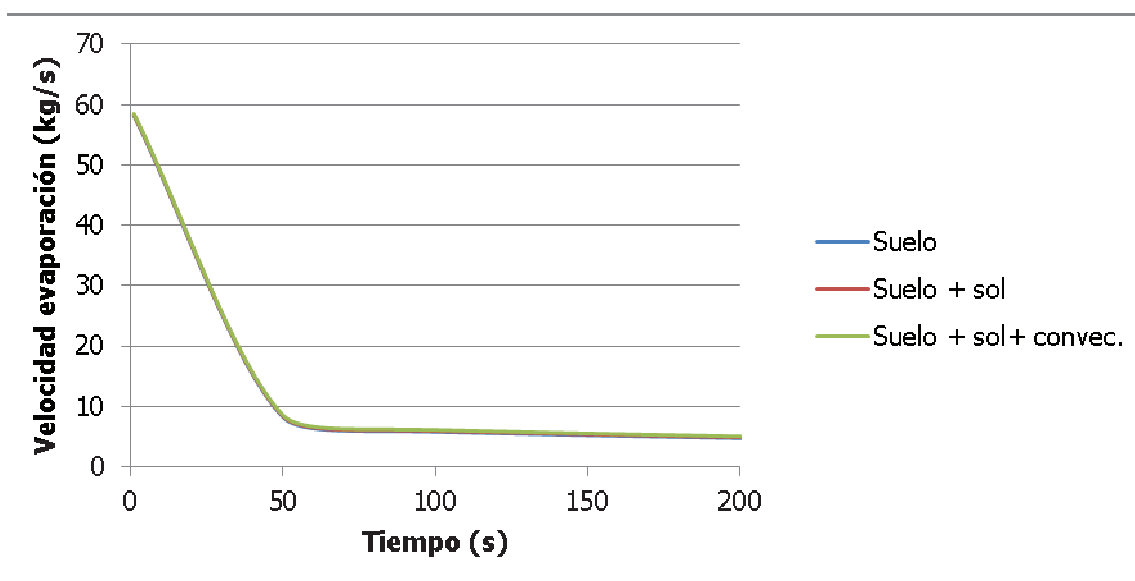
$$M(t) = 143 \int 0,47 \text{ t}^{\frac{1}{2}} dt + 0,14 \int dt + 0,15 \int dt = 134,42 \text{ t}^{\frac{1}{2}} + 0,14 t + 0,15 t$$

La Tabla [7.5] muestra los valores del flujo de evaporación y de la masa total evaporada en función del tiempo.

Tiempo (s)	Tasa evaporación [suelo] (kg/s)	Tasa evaporación [suelo+radiación] (kg/s)	Tasa evaporación [suelo+radiación + convección] (kg/s)	Masa total evaporada (kg)
1	58,20	58,34	58,49	135
50	8,23	8,37	8,52	965
100	5,82	5,96	6,11	1373
500	2,60	2,74	2,89	3151
1000	1,84	1,98	2,13	4541
5000	0,82	0,96	1,11	10955
10000	0,58	0,72	0,87	16342
50000	0,41	0,55	0,70	24810
96762	0,36	0,50	0,65	29245

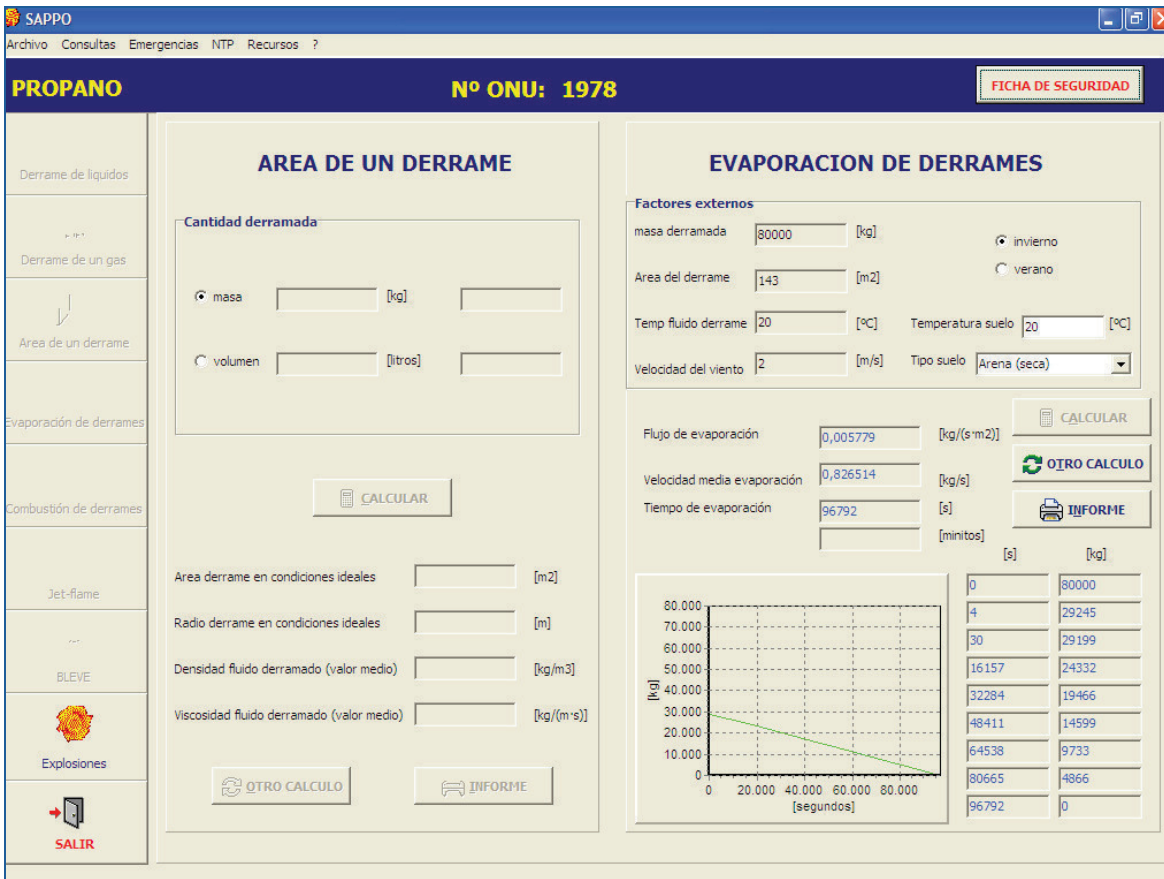
Tabla 7.5. Flujos de evaporación y masa total evaporada.

La representación de estos valores se muestra en la Gráfica 7.2



**Gráfica 7.2.** variación de la velocidad de evaporación con el tiempo, sin y con la influencia de la radiación solar

El uso del programa informático APPO para este mismo supuesto se muestra en el Esquema 7.2



Esquema 7.2. Pantalla de entrada y salida de datos para la simulación de un vertido de propano licuado

### Supuesto 3 – evaporación de un licuado inflamable

Los parámetros de la simulación son los siguientes:

Producto: etanol  
 Accidente: rotura contenedor cisterna  
 Depósito: cilíndrico horizontal  
 Capacidad: 31 m<sup>3</sup>  
 Contenido: 24000 kg de etanol



Suelo:	gravilla
Velocidad del viento:	1 m/s
Conductividad gravilla:	2,5 W/(mK)
Difusividad gravilla:	$11 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
Temperatura de almacenamiento:	25 °C = 298 K
Epoca del año:	verano

Etanol – presión de vapor:	$5,87 \cdot 10^3 \text{ Pa}$
Etanol – calor específico:	$2,427 \cdot 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
Etanol – calor latente vap.:	$8,41 \cdot 10^5 \text{ J}/\text{kg}$
Etanol – punto de ebullición:	344,8 K

Los datos de este supuesto han sido tomados de las instalaciones de Destil.leries ANTONIO ADAL SA. Corresponden a una posible situación real de derrame.

La evaporación de los 24000 kg de etanol derramados depende inicialmente (tal como se indica en el punto 7.3 de este capítulo) del calor que pueda absorber del suelo y del aire por un lado y de la radiación solar a la que esté expuesto por otro lado. Sin embargo, para el caso concreto de líquidos inflamables con "alto" punto de ebullición (los que no son gases licuados), la velocidad de evaporación depende en gran medida de la radiación solar y de la cantidad de energía recibida por convección de la atmósfera. No obstante, para confirmar su escasa influencia, también se considerará el calor absorbido del suelo.

En condiciones de idealidad, el área que ocupará el derrame, según la ecuación [7.1 bis] será:

$$A = 10^{0,492 \log(52910)+1,617} = 8729,4 \quad (\text{pies}^2) \quad \therefore \quad A = 810,98 \quad (\text{m}^2)$$

que en caso de ser circular, tendrá un radio (R) de 16 m.



A partir de este dato, los factores que influyen en la evaporación del etanol son:

### Calor transferido por conducción desde el suelo

Para suelos permeables, el flujo de calor se obtiene aplicando la ecuación [7.17]:

$$E_{\text{vap}} = \frac{8 \cdot 2,5 \cdot (298 - 344,8)}{810,98 \sqrt{\pi \cdot 11 \cdot 10^{-7}}} t^{-\frac{1}{2}} < 0 \rightarrow \text{es despreciable}$$

### Calor transferido por convección desde el aire - atmósfera

Se obtendrá aplicando la ecuación de Sutton para derrames circulares [7.7]:

$$E_{\text{vap}} = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 1_{10}^{0,78} \cdot 51,2^{-0,11} \cdot \frac{46 \cdot 10^5}{8310 \cdot 298} \ln \left[ 1 + \frac{5,87 \cdot 10^3 - 0}{10^5 - 5,87 \cdot 10^3} \right] = 1,64 \cdot 10^{-4} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

$$V_{\text{vap}} = A \cdot E_{\text{vap}} = 810,98 \cdot 1,64 \cdot 10^{-4} = 0,133 \text{ kg/s}$$

### Calor transferido por la radiación solar

El flujo de evaporación debido a la radiación solar ( $E_{\text{rs}}$ ) en verano es igual a:

$$E_{\text{rs}} = \frac{q_{\text{rs}}(\text{verano})}{\Delta H_v} = \frac{1170}{8,41 \cdot 10^5} = 1,39 \cdot 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

$$V_{\text{vap(solar)}} = A \cdot E_{\text{vap}} = 810,98 \cdot 1,39 \cdot 10^{-3} = 0,127 \text{ kg/s}$$





### Masa evaporada al cabo de un tiempo t

La masa evaporada al cabo de un tiempo t vendrá dada por la siguiente expresión:

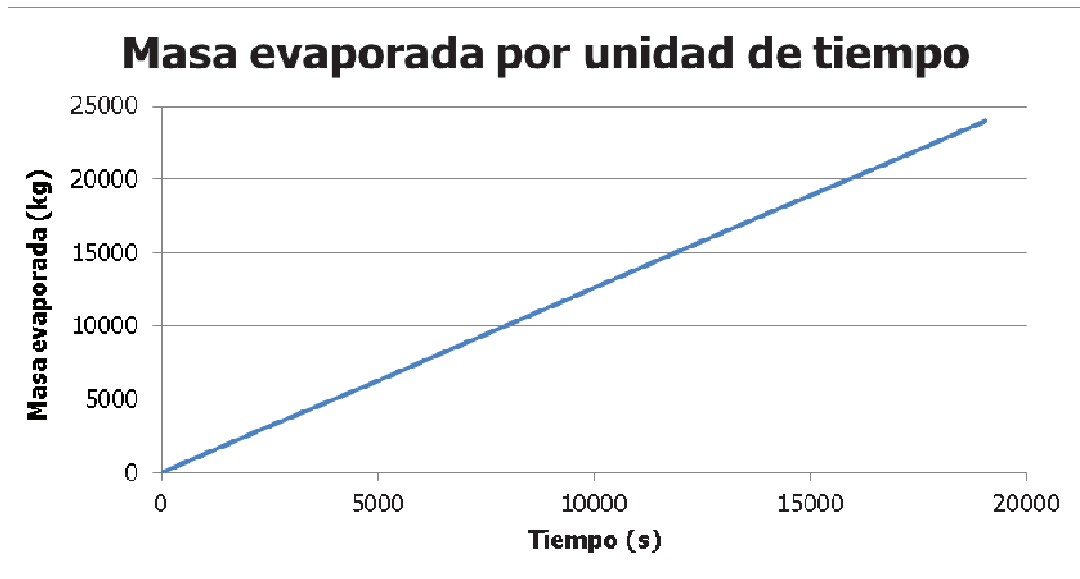
$$M(t) = 1,127 \int dt + 0,118 \int dt = 1,127t + 0,118t = 1,245t$$

La tabla [7.6] muestra los valores del flujo de evaporación y la masa total evaporada obtenidos para diferentes valores de tiempo.

Tiempo (s)	Tasa evaporación [suelo] (kg/s)	Tasa evaporación [suelo+radiación] (kg/s)	Tasa evaporación [suelo+radiación + convección] (kg/s)	Masa total evaporada (kg)
0	0	1,127	1,260	0
2380	0	1,127	1,260	3001
4760	0	1,127	1,260	6001
7141	0	1,127	1,260	9001
9521	0	1,127	1,260	12002
11902	0	1,127	1,260	15001
14288	0	1,127	1,260	18002
16663	0	1,127	1,260	21001
19043	0	1,127	1,260	24000

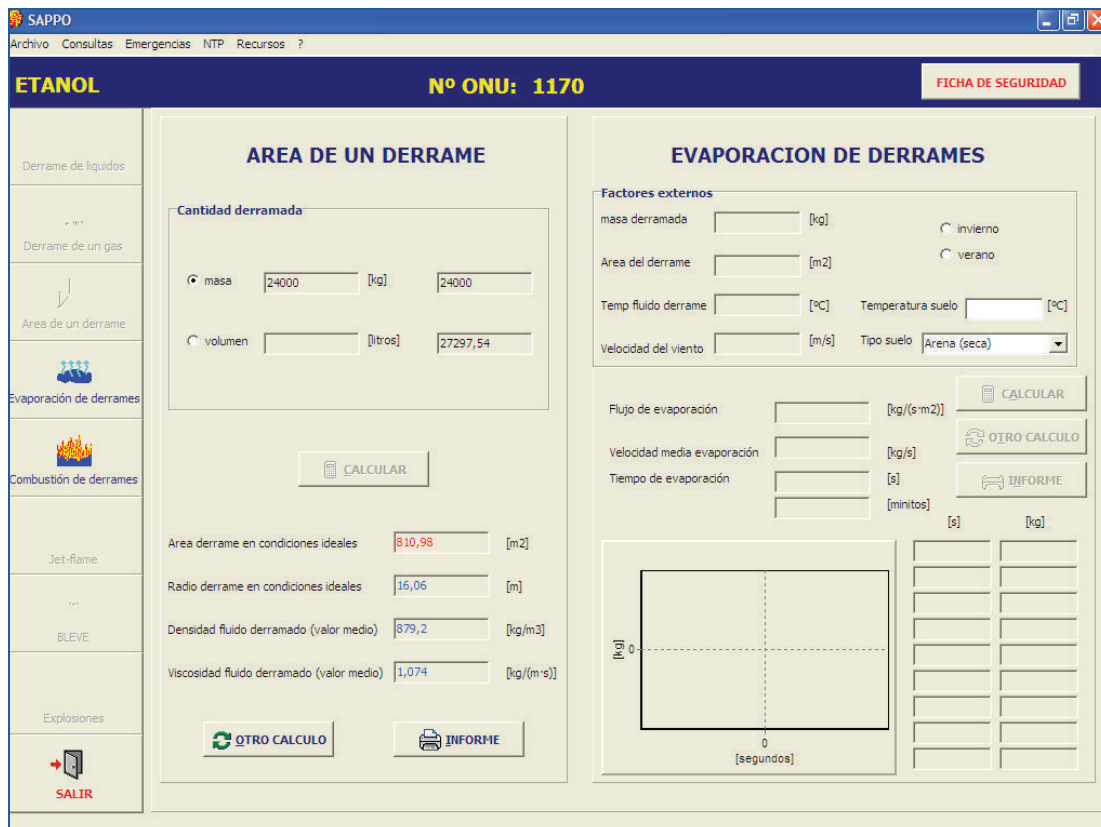
Tabla 7.6. Flujos de evaporación y masa total evaporada.

En este caso, la masa evaporada en función del tiempo es una recta, tal como se muestra en la Gráfica 7.3



Gráfica 7.3. Variación de la masa evaporada con el tiempo para un derrame de 24.000 kg de etanol

El esquema 7.3 muestra la pantalla del cálculo de la estimación teórica del área de un derrame y también el de su proceso de evaporación.



Esquema 7.3. Pantalla del cálculo de la estimación teórica del área de un derrame y también el de su proceso de evaporación.

El Esquema 7.4 muestra la pantalla de entrada y salida de datos del proceso de evaporación de 24.000 kg de etanol.

**ETANOL** Nº ONU: 1170 FICHA DE SEGURIDAD

**AREA DE UN DERRAME**

**Cantidad derramada**

masa: 24000 [kg] → 24000  
 volumen: [litros] → 27297,54

Area derrame en condiciones ideales: 810,98 [m<sup>2</sup>]  
 Radio derrame en condiciones ideales: 16,06 [m]  
 Densidad fluido derramado (valor medio): 879,2 [kg/m<sup>3</sup>]  
 Viscosidad fluido derramado (valor medio): 1,074 [kg/(m·s)]

**EVAPORACION DE DERRAMES**

**Factores externos**

masa derramada: 24000 [kg]  invierno  verano  
 Area del derrame: 810,98 [m<sup>2</sup>]  
 Temp fluido derrame: 25 [°C] Temperatura suelo: [°C]  
 Velocidad del viento: 1 [m/s] Tipo suelo: Arena (seca)

Flujo de evaporación: 0,001553999958 [kg/(s·m<sup>2</sup>)]   
 Velocidad media evaporación: 1,260262 [kg/s]   
 Tiempo de evaporación: 19043 [s]   
 317 [minutos]

[s]	[kg]
0	24000
2380	21001
4760	18002
7141	15001
9521	12002
11902	9001
14282	6001
16663	3001
19043	0

**Esquema 7.4.** Pantalla de entrada y salida de datos del proceso de evaporación de 24.000 kg de etanol.



**Combustión  
de líquidos derramados  
y radiación térmica.**







## 8.1 Introducción

No son los líquidos inflamables o combustibles los que arden o explotan, sino los vapores procedentes de su evaporación cuando son expuestos a una fuente de ignición (chispa, etc.) y se encuentran a una temperatura superior a su punto de inflamación.

La mezcla será inflamable cuando la concentración de vapor en el aire llega a una determinada proporción conocida como límite de inflamabilidad (o explosividad). El límite inferior de esta escala se conoce como límite inferior de inflamabilidad (LII), y el superior como límite superior de inflamabilidad (LSI). Las explosiones en las proximidades del límite inferior o superior son menos intensas que las que se generan con concentraciones intermedias. La Tabla 8.1 muestra los límites superiores e inferiores de inflamabilidad de varios productos derivados del petróleo.

La facilidad de ignición, así como la velocidad de combustión, son parámetros que están íntimamente relacionados con las propiedades físicas de los líquidos inflamables y combustibles (presión de vapor, índice de evaporación, punto de ebullición, etc.).

En consecuencia, las medidas de prevención de incendios y explosiones se basarán en una o más de las siguientes técnicas o principios:

- Eliminación de las fuentes de ignición.
- Eliminación del aire (oxígeno).
- Almacenaje de líquidos en sistemas o contenedores estancos.
- Ventilación para impedir concentraciones de vapor inflamables.
- Empleo de una atmósfera de gas inerte en lugar de aire.

Producto	LII [% vo.]	LSI [% voL.]	T inflamación [°C]	T autoencend [°C]
Acetona	2,6	12,8	-17,8	468
Acetileno (gas)	2,5	100	36,3	305
Alcohol etílico	3,3	19	12,8	423
Alcohol propílico	2,5	13,5	22	404
Anilina	1,3	--	70	617
Benceno	1,4	8	-17	562
Butano (gas)	1,9	8,5	-80	405
n-Decano	0,8	5,4	46,1	210
Etano (gas)	3	12,5	-135	515
Eter etílico	1,9	3,6	-45	160
Etileno (gas)	2,7	36	-136,3	490
Gasolina nº 56-60	1,4	7,6	-42,8	280
Gasolina nº 73	1,4	7,6	-42,8	300
Gasolina nº 92	1,5	7,6	-43	330
Gasolina nº 100	1,4	7,4	-43	371
Octano	1	6,5	13,3	220
Pentano	1,5	7,8	-40	260
Propano	2,2	9,5	-104	450
Tolueno	1,2	7,1	4,4	480

Tabla 8.1. LII, LSI, puntos de ebullición y puntos de autoignición de diferentes sustancias derivadas del petróleo



## 8.2 Clasificación de líquidos inflamables y combustibles

En lo que al transporte de mercancías peligrosas por carretera se refiere, el ADR en el marginal 2300 subdivide a las materias de la Clase 3 (materias líquidas inflamables) del modo siguiente:

- A.** Materias con un punto de inflamación inferior a 23 °C, no tóxicas, no corrosivas.
- B.** Materias con un punto de inflamación inferior a 23 °C, tóxicas.
- C.** Materias con un punto de inflamación inferior a 23 °C, corrosivas.
- D.** Materias con un punto de inflamación inferior a 23 °C, tóxicas y corrosivas, así como los objetos que contengan tales materias.
- E.** Materias con un punto de inflamación de 23 °C a 61 °C, valores límites comprendidos, que puedan presentar un grado menor de toxicidad o de corrosividad.
- F.** Materias y preparados que sirvan de plaguicidas con un punto de inflamación inferior a 23 °C.

- G.** Materias con un punto de inflamación superior a 61 °C, transportadas o entregadas al transporte en caliente a una temperatura igual o superior a su punto de inflamación.
  
- H.** Embalajes vacíos.

No obstante, a efectos de protección contra incendios, se ha establecido una clasificación arbitraria basada en la definición de líquidos inflamables que aparece en la norma nº 321 de la NFPA (National Fire Protection Association), *clasificación básica de líquidos inflamables y combustibles*, que los divide en tres clases:

- **Clase I.** Todos los líquidos cuyo punto de inflamación es inferior a 38 °C.
  - Clase IA. Líquidos cuyo punto de inflamación es inferior a 23 °C y su punto de ebullición es inferior a 38 °C.
  - Clase IB. Líquidos cuyo punto de inflamación es inferior a 73 °C y su punto de ebullición es superior a 38 °C.
  - Clase IC. Líquidos con punto de inflamación comprendido entre 23 y 38 °C.
  
- **Clase II.** Aquellos líquidos cuyo punto de inflamación está comprendido entre 38 y 60 °C.
  
- **Clase III.** Aquellos cuyo punto de inflamación es superior a los 60 °C. Requieren para su ignición una considerable aportación de calor de una fuente distinta al ambiente.

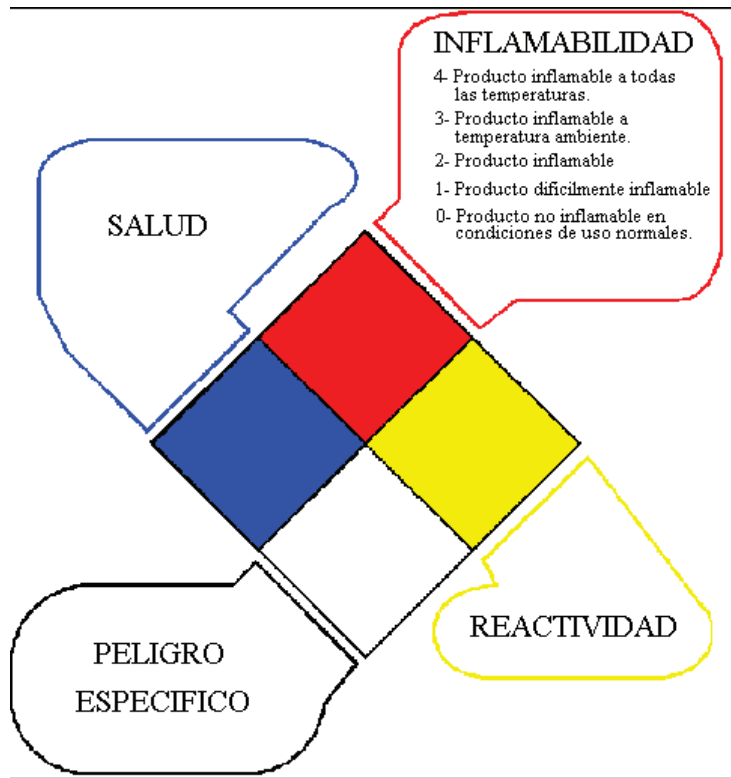
- Clase IIIA. Líquidos con punto de inflamación igual o superior a 60 °C e inferior a 93 °C.
- Clase IIIB. Líquidos con punto de inflamación igual o superior a 93 °C.

Esta clasificación, se ve reflejada también en la simbología que utiliza la NFPA para señalar las mercancías peligrosas. Se trata del "diamante de peligros" que podemos ver en muchos productos procedentes de EE UU.

En el rombo de color rojo aparece un número que corresponde al tipo de producto inflamable:

- 0.** Producto no inflamable
- 1.** Producto difícilmente inflamable
- 2.** Producto inflamable
- 3.** Producto inflamable a temperatura ambiente
- 4.** Producto inflamable a todas las temperaturas

El Esquema 8.1 describe visualmente cómo es esta señalización:



**Esquema 8.1.** Señalización de la NFPA: Rombo NFPA-704 (Diamante de peligro).

### 8.3 Energía necesaria para la ignición de vapores

Las principales fuentes de ignición de los líquidos inflamables son las llamas, superficies calientes, chispas eléctricas o de fricción y compresión adiabática.

**Llamas:** con excepción de las muy pequeñas producidas bajo condiciones de laboratorio, las llamas constituyen una fuente segura de ignición para las mezclas de vapor inflamable y aire que se encuentren dentro de sus márgenes de inflamabilidad. Las llamas deben ser capaces de calentar el vapor hasta su temperatura de ignición en presencia de aire. En algunos líquidos es necesario que la llama permanezca durante un tiempo y a una temperatura suficiente para calentar el vapor.

**Chispas eléctricas, estáticas y de fricción:** las chispas deben tener suficiente energía para poner en ignición las mezclas de vapor inflamable y aire. La temperatura de las chispas producidas por instalaciones eléctricas comerciales es superior a la de las llamas y generalmente son capaces de producir la ignición de las mezclas inflamables. Sin embargo, las chispas de fricción pueden no llegar a producir la inflamación de las mezclas, ya que su corta duración puede impedir que eleven la temperatura del vapor hasta su punto de ignición. Por otra parte, no basta con que una chispa eléctrica tenga suficiente intensidad y longitud para que pueda tener lugar la ignición; deben darse, además, ciertas condiciones. La naturaleza de los puntos y superficies de los que procede la chispa, así como la composición, temperatura y presión de las mezclas vapor-aire son



las principales variables que afectan a la ignición. La mayor parte de estos factores se aplican también a las chispas originadas por la electricidad estática y a las de fricción, puesto que, en cualquier caso, o incluso ambas, para crear la cantidad de calor que produzca la ignición.

**Superficies calientes:** las superficies calientes pueden convertirse en fuentes de ignición siempre y cuando tengan dimensión y temperatura suficientes. Cuanto menor sea la superficie caliente mayor debe ser su temperatura para producir la ignición de la mezcla. Y, por el contrario, a mayor superficie caliente en relación con la mezcla, la ignición será más rápida y se necesitará una menor temperatura para producirla. Sin embargo, un líquido inflamable debe permanecer en contacto con la superficie caliente el tiempo suficiente para que se forme una mezcla de vapor y aire, dentro de los límites de inflamabilidad.

**Compresión adiabática:** este tipo de compresión ha sido la causa de varias explosiones muy destructivas. Cuando se aplica en un ambiente dirigido y regulado, no es peligrosa; constituye, por ejemplo, la base del funcionamiento de los motores Diesel. Si se comprime rápidamente una mezcla inflamable, entrará en ignición cuando la compresión llegue a generar el calor suficiente para elevar la temperatura de los vapores inflamables hasta su punto de ignición.

### 8.4 Incendio de un derrame y velocidad de quemado $v_0$

Los derrames de líquidos volátiles, se evaporan rápidamente formando sus vapores mezclas combustibles con el aire que los rodea. Ante una fuente de ignición, la experiencia ha demostrado, siempre que la proporción "aire – vapor combustible" haya llegado al LII (límite inferior de inflamabilidad), las llamas aparecen en diversos puntos que se van extendiendo sobre la totalidad del área del líquido derramado.

Para una sustancia de fórmula química  $C_N H_M O_L F_K$ , la ecuación (Zebatakis, 1964) que indica la proporción estequiométrica, o más concretamente la proporción o concentración de vapor combustible en aire expresada en % vol ( $C_c$ ) es la siguiente:

$$C_c = \frac{100}{1 + 4,733 \left( N + \frac{M - K - 2L}{4} \right)} \quad [8.1]$$

Se entiende por velocidad de quemado de un derrame ( $v_0$ ) a la velocidad a la que el nivel de un líquido derramado y en combustión, disminuye con el tiempo. De este modo, la velocidad a la que la masa de un líquido volátil se está quemando vendrá dada por el producto entre la velocidad de quemado y la densidad del hidrocarburo.

La velocidad de quemado o combustión de los líquidos inflamables varía en una forma similar a la velocidad de propagación de las llamas. La gasolina, por ser un compuesto de fracciones ligeras y pesadas, tendrá una velocidad de combustión más rápida al principio, mientras que se queman las fracciones más ligeras; las más pesadas se quemarán a una velocidad parecida a la del keroseno. La velocidad de combustión de la gasolina es de 150 a 300 mm por hora y la del keroseno de 130 a 200 mm por hora.

De hecho, en una serie de ensayos realizados por la U.S. Bureau of Mines, se determinaron las velocidades de combustión de varios líquidos y gases, concluyendo que tienden a un valor máximo y constante a medida que aumenta el diámetro del charco. La velocidad sigue cierta proporcionalidad a la relación que existe entre el calor de combustión y vaporización.

Mediciones de tiempos de quemado (derrames de petróleo generalmente) confirman esta relación entre la velocidad de quemado del líquido derramado y las propiedades físico-químicas del mismo (Zabetakis, 1964):

$$v_Q = 0,0076 \frac{\Delta H_{\text{comb}}}{\Delta H_{\text{vap}}} \quad [8.2]$$

donde:  $v_Q$ : velocidad de quemado (cm/min)  
 $\Delta H_{\text{comb}}$ : calor de combustión  
 $\Delta H_{\text{vap}}$ : calor de vaporización

Por el contrario, la norma NTP-326 hace referencia al caudal de vaporización en la combustión, al igual que de otros parámetros indicados en las ecuaciones [8.7], [8.8], [8.9] y [8.10] de este capítulo.

Las expresiones más simples para determinar velocidades de quemado, abarcan un amplio campo de puntos de ebullición; primeramente Burges (1961) propuso una relación



entre la velocidad de quemado y las propiedades termoquímicas del fluido, aunque las expresiones más sencillas (Handbook of Chemical Hazard Analysis Procedures) para determinar la velocidad de quemado ( $v_Q$ ) de un derrame se basan en el conocimiento de los puntos de ebullición, sin tener en cuenta para nada las dimensiones o área del derrame:

$$v_Q = \frac{92,6 e^{-0,0043 T_b} (PM) 10^{-7}}{\rho} \quad [8.3]$$

donde:

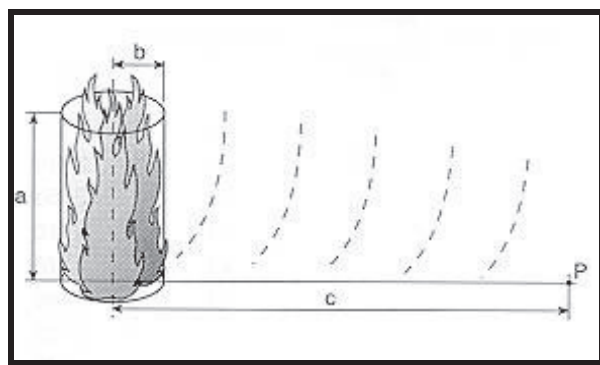
- $v_Q$ : velocidad de quemado (m/s)
- (PM): masa molecular (kg/mol)
- $\rho$ : peso específico del líquido (kg/m<sup>3</sup>)
- $T_b$ : punto de ebullición (°F)



### 8.5 Incendio de un derrame; radiación térmica $q$

La intensidad de la radiación térmica recibida por un ser vivo u objeto situado en el campo de influencia de un incendio depende de las condiciones atmosféricas (humedad ambiente), de la geometría del incendio (diámetro de la base del incendio, altura de las llamas y distancia al punto irradiado) y de las características físico-químicas del producto en combustión.

La determinación de la intensidad de irradiación por unidad de superficie ( $q$ ) que se recibe en un punto P situado a una distancia  $c$  del incendio (Figura 8.1) puede estimarse mediante la ecuación:



**Figura 8.1.** Forma de incendio cilíndrico vertical.

La intensidad de irradiación de una sustancia determinada puede estimarse mediante la siguiente ecuación:

$$q = d F E \quad [8.4]$$

siendo:

- q: intensidad de irradiación a una distancia determinada ( $\text{kW/m}^2$ ).
- d: coeficiente de transmisión atmosférica.
- F: factor geométrico de visión, de vista o de forma.
- E: intensidad media de radiación de la llama ( $\text{kW/m}^2$ ).

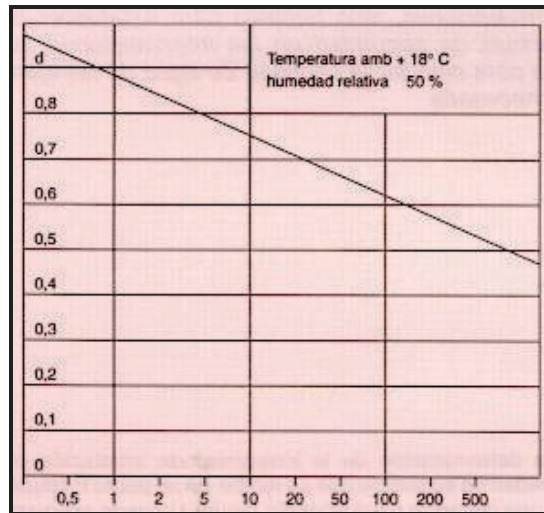
los métodos de cálculo más usuales para cada uno de los tres parámetros que es preciso conocer para evaluar la intensidad de la irradiación, son los siguientes:

### **Coefficiente de transmisión atmosférica d**

Parte del calor radiante es absorbido por el aire existente entre el objeto expuesto a la radiación y el incendio. Esta reducción entre la radiación emitida y la recibida se tiene en cuenta mediante el coeficiente de transmisión atmosférica (d). El valor de (d) es función de la cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera existente entre el foco emisor de radiación y el receptor. Este valor se puede obtener instantáneamente mediante gráficos o fórmulas empíricas.

Una serie de gráficos suministran el coeficiente de transmisión (d) en función de la distancia (c) para diferentes temperaturas ambientales y grados de humedad relativa (Gráfico 8.1 extraído de Hoftwzer, GW – Heat radiation).

Por otro lado, la presión parcial del vapor de agua se calcula a partir de la humedad relativa del aire ambiental y de los valores de las presiones de vapor saturado a diferentes temperaturas dados en la Tabla 8.2 (extraída de Hoftwzer, GW – Heat radiation).



**Gráfico 8.1.** Coeficiente de transmisión  $d$  en función de la distancia  $c$ . Temperatura ambiente + 18 °C y humedad relativa 50 %.

Temperatura [°C]	Presión de vapor [Pa]	Temperatura [°C]	Presión de vapor [Pa]
0	600	19	2170
2	700	20	2310
4	800	21	2450
6	920	22	2610
8	1060	23	2770
10	1210	24	2940
11	1300	25	3130
12	1380	26	3320
14	1580	27	3520
15	1680	28	3730
16	1790	29	3950
17	1920	30	4190
18	2040		

Tabla 8.2. Presión de vapor saturado del agua (Pa) en función de la temperatura (°C).

Así, para un caso determinado, la presión parcial de vapor se calcula multiplicando la humedad relativa por la presión de vapor saturado del agua a la temperatura existente.

Una fórmula empírica empleada normalmente es la siguiente, propuesta por Pietersen y Huerta (TNO):

$$d = 2,02 ( P_v c )^{-0,09}$$

siendo:  $P_v$ : presión parcial del vapor de agua a la temperatura  $T$  (Pa)  
 $c$ : longitud de recorrido de la radiación, distancia desde la superficie de la llama al blanco receptor (m).

### **Factor de visión geométrico**

El factor de visión geométrico o factor de forma es un coeficiente que valora el efecto de la forma geométrica de las llamas (altura alcanzada y dimensiones de la superficie de líquido incendiado), de la distancia al punto  $P$ , o superficie irradiada y de la posición u orientación (horizontal, vertical, inclinada) de dicha superficie. Este factor se simboliza  $F_v$  para superficies verticales,  $F_h$  para horizontales y  $F_{m\acute{a}x}$  para una superficie inclinada de irradiación máxima.

Los dos tipos más comunes de forma de incendio para las cuales se dan los correspondientes valores del factor de visión, indicados en las Tablas 8.3 y 8.4 son: el incendio de forma cilíndrica vertical y el incendio de forma rectangular, respectivamente.



En las páginas siguientes se adjuntan tablas de los factores de visión que propone A.I.Ch.E. (Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis):

Factor de visión horizontal, $F_h$										
a/b	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	6.0	10.0	20.0
c/b										
1.10	0.132	0.242	0.332	0.354	0.360	0.362	0.362	0.362	0.363	0.363
1.20	0.044	0.120	0.243	0.291	0.307	0.310	0.312	0.312	0.313	0.313
1.30	0.020	0.065	0.178	0.242	0.268	0.274	0.277	0.270	0.278	0.279
1.40	0.011	0.038	0.130	0.203	0.238	0.246	0.250	0.251	0.252	0.253
1.50	0.005	0.024	0.097	0.170	0.212	0.222	0.228	0.229	0.231	0.232
2.00	0.001	0.005	0.027	0.073	0.126	0.145	0.158	0.160	0.164	0.166
3.00	0.000	0.000	0.005	0.019	0.050	0.071	0.091	0.095	0.103	0.106
4.00	0.000	0.000	0.001	0.007	0.022	0.038	0.057	0.062	0.073	0.078
5.00	0.000	0.000	0.000	0.003	0.011	0.021	0.037	0.043	0.054	0.061
10.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.007	0.009	0.017	0.026
20.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.003	0.003
50.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Factor de visión vertical, $F_v$										
1.10	0.330	0.415	0.449	0.453	0.454	0.454	0.454	0.454	0.454	0.454
1.20	0.196	0.308	0.397	0.413	0.416	0.416	0.416	0.416	0.416	0.416
1.30	0.130	0.227	0.344	0.376	0.383	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384
1.40	0.096	0.173	0.296	0.342	0.354	0.356	0.356	0.357	0.357	0.357
1.50	0.071	0.135	0.253	0.312	0.229	0.312	0.333	0.333	0.333	0.333
2.00	0.028	0.056	0.126	0.194	0.236	0.245	0.248	0.249	0.249	0.249
3.00	0.009	0.019	0.047	0.086	0.132	0.150	0.161	0.163	0.165	0.166
4.00	0.005	0.010	0.024	0.047	0.080	0.100	0.115	0.119	0.123	0.124
5.00	0.003	0.006	0.015	0.029	0.053	0.069	0.086	0.091	0.097	0.099
10.00	0.000	0.001	0.003	0.006	0.013	0.019	0.029	0.032	0.042	0.048
20.00	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.004	0.007	0.009	0.014	0.020
50.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.004
Factor de visión máximo, $F_{max}$										
1.10	0.356	0.481	0.559	0.575	0.580	0.581	0.581	0.581	0.581	0.581
1.20	0.201	0.331	0.466	0.505	0.517	0.519	0.520	0.521	0.521	0.521
1.30	0.132	0.236	0.387	0.448	0.468	0.472	0.474	0.474	0.475	0.475
1.40	0.094	0.177	0.323	0.398	0.427	0.433	0.436	0.436	0.437	0.437
1.50	0.072	0.138	0.271	0.355	0.392	0.400	0.404	0.404	0.405	0.406
2.00	0.028	0.056	0.129	0.208	0.267	0.285	0.294	0.296	0.299	0.300
3.00	0.009	0.019	0.048	0.088	0.141	0.160	0.183	0.189	0.195	0.197
4.00	0.005	0.010	0.024	0.047	0.083	0.106	0.129	0.134	0.143	0.147
5.00	0.003	0.005	0.015	0.029	0.054	0.073	0.094	0.100	0.111	0.117
10.00	0.000	0.001	0.003	0.006	0.013	0.019	0.030	0.034	0.045	0.055
20.00	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.004	0.007	0.009	0.014	0.022
50.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.004

Tabla 8.3. Factor de visión geométrico para incendio cilíndrico.





Factor de visión horizontal, $F_h$								
a/b c/b	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	1,0	1,5	2,0
0,1	0,0732	0,1380	0,1705	0,1998	0,2126	0,2217	0,2279	0,2305
0,2	0,0263	0,0728	0,1105	0,1549	0,1774	0,1944	0,2063	0,2113
0,3	0,0127	0,0414	0,0720	0,1182	0,1459	0,1687	0,1855	0,1928
0,4	0,0073	0,0257	0,0485	0,0899	0,1190	0,1452	0,1660	0,1752
0,5	0,0047	0,0171	0,0339	0,0687	0,0966	0,1243	0,1478	0,1588
0,6	0,0032	0,0120	0,0245	0,0530	0,0784	0,1059	0,1312	0,1436
0,7	0,0023	0,0087	0,0182	0,0414	0,0638	0,0903	0,1162	0,1296
0,8	0,0017	0,0065	0,0139	0,0327	0,0522	0,0767	0,1028	0,1169
0,9	0,0013	0,0050	0,0108	0,0261	0,0429	0,0653	0,0908	0,1054
1,0	0,0010	0,0040	0,0086	0,0211	0,0355	0,0557	0,0803	0,0951
1,2	0,0007	0,0026	0,0056	0,0142	0,0249	0,0409	0,0629	0,0774
1,5	0,0004	0,0015	0,0032	0,0084	0,0152	0,0265	0,0440	0,0572
2	0,0002	0,0007	0,0015	0,0041	0,0076	0,0139	0,0253	0,0355
3	0,0001	0,0002	0,0005	0,0013	0,0026	0,0050	0,0100	0,0154
4	—	0,0001	0,0002	0,0006	0,0011	0,0023	0,0047	0,0077
5	—	—	0,0001	0,0003	0,0006	0,0012	0,0026	0,0043

Factor de visión vertical, $F_v$												
b/c a/c	10	5	3	2	1	0,75	0,50	0,25	0,2	01	0,05	0,02
10	0,2480	0,2447	0,2369	0,2234	0,1767	0,1499	0,1118	0,0606	0,0490	0,0249	0,0125	0,0050
5	0,2447	0,2421	0,2350	0,2221	0,1750	0,1491	0,1114	0,0604	0,0489	0,0248	0,0124	0,0050
3	0,2369	0,2350	0,2292	0,2176	0,1734	0,1478	0,1101	0,0598	0,0483	0,0245	0,0123	0,0049
2	0,2234	0,2221	0,2176	0,2078	0,1674	0,1427	0,1068	0,0581	0,0470	0,0239	0,0120	0,0048
1	0,1767	0,1760	0,1734	0,1674	0,1385	0,1193	0,0902	0,0494	0,0400	0,0203	0,0102	0,0041
0,75	0,1499	0,1494	0,1475	0,1427	0,1193	0,1032	0,0784	0,0431	0,0349	0,0178	0,0089	0,0036
0,50	0,1118	0,1114	0,1101	0,1068	0,0902	0,0784	0,0599	0,0331	0,0268	0,0137	0,0069	0,0027
0,25	0,0606	0,0604	0,0598	0,0581	0,0494	0,0431	0,0331	0,0184	0,0149	0,0076	0,0038	0,0015
0,20	0,0490	0,0489	0,0483	0,0470	0,0400	0,0349	0,0268	0,0149	0,0121	0,0062	0,0031	0,0012
0,10	0,0249	0,0248	0,0245	0,0239	0,0203	0,0178	0,0137	0,0076	0,0062	0,0031	0,0016	0,0006
0,05	0,0123	0,0124	0,0123	0,0120	0,0102	0,0089	0,0069	0,0038	0,0031	0,0016	0,0008	0,0003
0,002	0,0050	0,0050	0,0049	0,0048	0,0041	0,0036	0,0027	0,0015	0,0012	0,0006	0,0003	0,0001

$$F_{mix} = \sqrt{F_v^2 + F_h^2}$$

**Tabla 8.4.** Factor de visión geométrico para incendio rectangular.



### Incendio de forma cilíndrica vertical

Corresponde a un depósito cilíndrico ardiendo y adopta la forma representada en la Figura 8.1 asimilable a un cilindro en el que:

- a: altura de la llama
- b: radio del recipiente
- c: distancia entre P y el centro de la base de las llamas
- m: tasa de combustión

El valor de la altura (a) de la llama se puede calcular con la fórmula empírica:

$$a = 29 b^{0,7} m^{0,6} \quad [8.5]$$

que depende de la dimensión conocida (b) y del parámetro (m) que es el caudal de producto evaporado también llamado tasa de combustión ( $\text{Kg}/\text{m}^2 \text{ s}$ ).

Otra fórmula alternativa es la dada por Thomas (1963):

$$\frac{a}{D} = 42 \left[ \frac{m}{\rho_a D \sqrt{g}} \right]^{0,61} \quad [8.6]$$

en donde (D) es el diámetro equivalente del incendio,  $\rho_a$  = densidad del aire ( $1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$ ), y g la aceleración de la gravedad ( $9,8 \text{ m}/\text{s}^2$ ).

El caudal de evaporación en la combustión (m) se calcula mediante la expresión (en  $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ):



$$m = K \frac{\Delta H_c}{\Delta H_v} 10^{-3} \quad [8.7]$$

siendo:        K:        parámetro adimensional función de la temperatura de ebullición.  
                   $\Delta H_c$ :    calor de combustión del producto evaporado (J/kg).  
                   $\Delta H_v$ :    calor latente de vaporización (J/kg).

Al calcular el caudal de producto evaporado se debe introducir el valor del parámetro K para lo cual se hace la distinción siguiente:

### **Líquidos con punto de ebullición inferior a la temperatura ambiente**

El caudal de evaporación está influenciado por la radiación interior de las llamas y por el calor proporcionado por el pavimento.

El primer parámetro tiene el siguiente valor (en  $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ):

$$m = \frac{\Delta H_c}{\Delta H_v} 10^{-3} \quad [8.8]$$

El caudal originado por la absorción de calor del pavimento disminuye rápidamente con el tiempo por lo que el valor dado por la fórmula anterior adecuado para la mayoría de líquidos.

Esta aproximación equivale a considerar el coeficiente  $K = 1$ .

### Líquidos con punto de ebullición superior a la temperatura ambiente

En un escape de este tipo de líquidos tiene lugar el proceso de evaporación normal. En caso de incendio parte del calor radiante se emplea en calentar el líquido (o la capa superficial) hasta su punto de ebullición y parte se utiliza para la evaporación.

El coeficiente K adopta la expresión:

$$K = \frac{\Delta H_v}{C_p \Delta T + \Delta H_v} \quad [8.9]$$

donde  $C_p$  corresponde al calor específico a presión constante (J/kg·K) y  $\Delta T$  a la diferencia entre la temperatura de ebullición del líquido y la temperatura ambiente en grados Kelvin (K).

El denominador representa el calor total necesario para calentar 1 kg de líquido desde la temperatura ambiente hasta su punto de ebullición y su evaporación subsiguiente. Se supone que los valores  $C_p$  y  $\Delta H_v$  son independientes de la temperatura.

Sustituyendo el valor de K en la fórmula general se tiene el caudal de evaporación:

$$m = \frac{\Delta H_v}{C_p \Delta T + \Delta H_v} \frac{\Delta H_c}{\Delta H_v} 10^{-3} \quad [8.10]$$

Conociendo (m) y (b) se calcula la altura de las llamas (a). El valor (c), distancia entre el punto considerado y el centro de la base de las llamas se elige para las distancias deseadas.

Mediante los valores de las relaciones  $(a/b)$  y  $(c/b)$  y con la ayuda de la Tabla 8.3 se obtiene el factor de visión geométrico para las tres posiciones horizontal, vertical e inclinada máxima del blanco irradiado frente al incendio cilíndrico.

### Incendio de forma rectangular

Adopta la forma representada en la Figura 8.2, asimilable a un incendio de líquido derramado en un cubeto, charco o piscina rectangular. Es la forma normalmente esperada cuando el incendio sobrepasa el propio recipiente, pero queda delimitado por el propio recinto de contención.

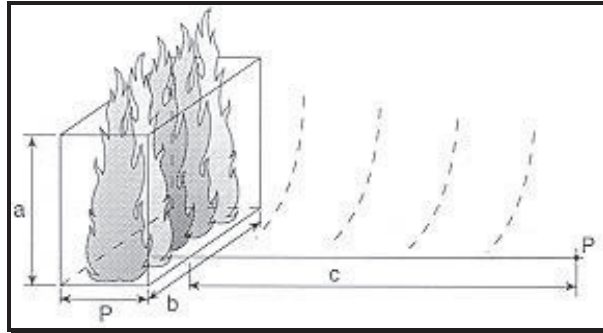
En este caso la altura de las llamas también se calcula con la misma fórmula que vimos en incendios circulares.

$$a = 29 b_{eq}^{0,7} \cdot m^{0,6} \quad [8.11]$$

en que la  $(b)$  se ha sustituido por  $(b_{eq})$  para lo cual se equipara el área del rectángulo a un círculo de radio  $(b_{eq})$  obteniendo

$$b p = \pi b_{eq}^2 \quad [ 8.12]$$

Mediante las relaciones  $(a/b)$ ,  $(c/b)$ ,  $(b/c)$  y  $(a/c)$  y con la ayuda de la Tabla 8.4 se obtiene el factor de visión geométrico para las tres posiciones  $F_h$ ,  $F_v$  y  $F_{m\acute{a}x}$ .



**Figura 8.2.** Forma de incendio con frente rectangular.

### **Intensidad de radiación de la llama (E)**

La intensidad media de radiación (E) de las llamas de un incendio depende del tipo de combustible y del diámetro de la base del líquido incendiado.

La dependencia del diámetro de la base del líquido incendiado se fundamenta en los siguientes puntos:

- El nivel de turbulencia de una llama está afectado por el diámetro.
- Si la llama es ópticamente transparente, la intensidad de radiación es función del diámetro.
- A mayor diámetro, aumenta la posibilidad de formación de humo negro y hollín debido a la deficiencia de oxígeno en la zona interna del incendio.
- En general la intensidad de radiación (E) varía entre 40 y 140 kW/m<sup>2</sup>.

Las Tablas 8.5 y 8.6 muestran la intensidad media de la radiación en la superficie de la llama.

Líquidos con temperatura de ebullición superior a la temperatura ambiente	Intensidad media (kW/m <sup>2</sup> )
Acetato de vinilo	30
Acetonitrilo	37
Acrilonitrilo	26
Acido fórmico	2
Alcohol alílico	38
Acrilato de metilo	30
Benceno	70
Bromo	--
n-butil mercaptano	85
t-butil mercaptano	73
Cloroformo	1
Cloruro de alilo	32
Dicloropropano	20
Dietilamina	77
Disulfuro de carbono	16
Epiclorhidrina	22
Etilendiamina	30
Etil mercaptano	59
Formiato de etilo	30
Formato de metilo	19
Metanol	15
Nafta disolvente	68
Oxido de propileno	45
Tetracloruro de carbono	1
Tetraetilo de plomo	20
Tetrahidrotiofeno	--

Tabla 8.5. Intensidad media de radiación de la superficie de la llama

Líquidos con temperatura de ebullición inferior a la temperatura ambiente	Intensidad media (kW/m <sup>2</sup> )
Acetaldehido	32
Amoniaco	13
Butadieno	86
Butano	94
Bromuro de metilo	8
Butileno	93
Cloruro de etilo	14
Cloruro de metilo	14
Cloruro de vinilo	26
Dimetilamina	61
Etano	89
Etileno	89
Metano	95
Oxido de etileno	35
Monóxido de carbono	14
Propano	92
Propileno	93
Sulfuro de hidrógeno	20

Tabla 8.6. Intensidad media de radiación de la superficie de la llama

En las Tablas 8.5 y 8.6 (Hoftwzer GW - Heat radiation) se mostraron, para diversos combustibles, los valores de E, que sirven para calcular la irradiación recibida a una cierta distancia del incendio.





## 8.6 Poder emisor de las llamas (PE) y radiación térmica (q) en el incendio de un derrame. Fórmulas aproximadas

En todo incendio, y lógicamente en el de un derrame, las llamas producen una emisión de radiación térmica cuyo valor depende en gran medida de los siguientes factores:

- características geométricas de la llama
- conocer las propiedades radiantes de la llama
- estimación de los coeficientes de atenuación
- considerar todos los *factores de visión* existentes entre el observador y la llama

Evidentemente la radiación emitida dependerá del **tamaño** de la llama, de la **mezcla** existente (aire-llama) y de la **temperatura** de la misma, teniendo en cuenta además, que alguna fracción de la radiación térmica es absorbida por el CO<sub>2</sub> y vapor de agua existentes en la atmósfera circundante.

La ecuación que describe el poder emisor de un fuego, fruto de la combustión de un derrame de líquido inflamable, se ha obtenido a partir de datos bibliográficos y correlacionando puntos normales de ebullición de diferentes fueles, tal como proponen Huggland (1976) y Alger (1979):

$$q = -0,313 T_B + 117 \quad [8.13]$$

donde:  $q$ : poder emisor efectivo o radiación térmica (kW/m<sup>2</sup>)  
 $T_B$ : punto normal de ebullición (°F)

a la cual se le debe añadir, para los materiales cuyo punto de ebullición es superior a 30 °F y que por tanto producen hollín, 20 kW/m<sup>2</sup> (poder emisor del hollín).

Ecuaciones más complejas incluyen también un *factor de visión* (FV) que será función de la distancia existente entre el observador-llama, de la orientación de los observadores y de la geometría de la llama, y una variable denominada transmisividad  $\tau$  que es función de la distancia que separa observador-llama, humedad relativa y temperatura de la llama.

$$q = P_E \tau 1,143 \left( \frac{R}{d} \right)^{1,757} \quad [8.14]$$

donde:  $q$ : radiación térmica (kW/m<sup>2</sup>)  
 $P_E$ : poder emisor efectivo (kW/m<sup>2</sup>)  
 $\tau$ : transmisividad  
 $R$ : radio medio del derrame (m)  
 $d$ : distancia al centro de la llama (m)

$$\text{factor de visión : } FV = 1,143 \left( \frac{R}{d} \right)^{1,757} \quad [8.15]$$

que en el caso de un derrame continuo:

$$R = \sqrt{\frac{Q_d}{\pi v_Q}} \quad [8.16]$$

- $Q_d$  caudal de derrame ( $m^3/s$ )  
 $v_Q$  velocidad de quemado ( $m/s$ )

Datos experimentales realizados por la United States Federal Safety Standards for Liquefied Gas Facilities (49CFR, Part 193, 1980) sobre los peligros que entraña la radiación térmica sugieren:

- un flujo de aproximadamente  $5 \text{ kW/m}^2$  que incide directamente sobre un observador, le causará quemaduras de segundo grado sobre la piel desnuda (descubierta) si la duración de la exposición es de aproximadamente 45 segundos. Este nivel se utiliza como criterio para lesiones.
- un flujo incidente de aproximadamente  $10 \text{ kW/m}^2$  causará rápidamente quemaduras de tercer grado, las cuales pueden conducir a la muerte.

Estos dos niveles son los usados habitualmente para determinar las zonas de riesgo para los accidentes (Buettner K 1981).

$$d_{10} = 0,30 \frac{R}{0,3048} P_E^{0,57} \text{ (pies)} \quad [8.17]$$

$$d_{05} = 0,43 \frac{R}{0,3048} P_E^{0,57} \text{ (pies)} \quad [8.18]$$



## 8.7 Modelos de vulnerabilidad. Método "Probit"

Para evaluar las consecuencias que puede causar la radiación térmica de un incendio de un determinado producto y dimensiones es necesario conocer la irradiación ( $q$ ) recibida a diferentes distancias mediante la expresión ya citada  $q = d F E$  [8.4] en la cual se sustituyen los valores del coeficiente de transmisión atmosférica  $d$ , el factor de visión  $F$  y la intensidad media de radiación  $E$ .

Las distancias consideradas (m) y las irradiaciones recibidas en ( $\text{kW}/\text{m}^2$ ) configuran un mapa para la fuente de radiación estudiada en la que se trazan círculos concéntricos de isorradiación que pueden quedar reducidos a un sector en el caso de no existir personas o bienes en todo el entorno circular de la fuente de radiación.

Los valores de la irradiación recibida en función de la distancia se comparan con referencias como las indicadas en la Tabla 8.7 (Romano A, Piccinini N, y GC Bello), que dan la máxima radiación tolerable para materiales y personas.

En la Directriz Básica para la elaboración y homologación de los Planes Especiales del Sector Químico (BOE 6-2-1991) se establecen unos valores umbrales que deberán adoptarse para la delimitación de la "Zona de Intervención y de Alerta" que son respectivamente  $5 \text{ kW}/\text{m}^2$  con un tiempo máximo de exposición de 3 minutos y  $3 \text{ kW}/\text{m}^2$  (sin indicación de tiempo máximo de exposición).

<b>Materiales y personas</b>	<b>Irradiación térmica [kW/m<sup>2</sup>]</b>
<b>Materiales</b>	
Pared de ladrillos	400
Hormigón armado	200
Cemento	60
Acero	40
Madera	10
<b>Personas</b>	
Durante 20 segundos sin quemaduras	6,5
Bomberos y personas protegidas	4,7
Personas desprotegidas	4,0

Tabla 8.7. Máxima radiación tolerable para materiales y personas

El límite soportable por las personas es de 4 a 5 kW/m<sup>2</sup>, debiendo tenerse en cuenta que la radiación recibida del sol en un día de verano es aproximadamente 1 kW/m<sup>2</sup>.

Los modelos de vulnerabilidad sirven para determinar las consecuencias a las personas e instalaciones expuestas a una determinada carga térmica, tóxica o de sobrepresión. Estos modelos se basan en experiencias realizadas con animales en laboratorio o en estudios de las muertes o lesiones de accidentes ocurridos.

Entre los modelos de vulnerabilidad se destaca el método «Probit», que es un método estadístico que da una relación entre la función de probabilidad y una determinada carga de exposición a un riesgo.



Según la legislación vigente, existen unos umbrales mínimos que sirven para determinar las zonas potencialmente afectadas por un accidente:

- 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.
- Zona de alerta. Es aquella en la que las consecuencias de los accidentes provocan efectos que, aunque perceptibles por la población, no justifican la intervención, excepto para los grupos críticos, que serán definidos por el responsable del equipo de intervención para cada caso concreto.

El método "Probit" parte de la manifestación física de un incidente (por ejemplo, la concentración tóxica y tiempo de exposición en una cierta área geográfica) y da como resultado una previsión de los daños a las personas expuestas al incidente (es decir, número de heridos, número de víctimas, etc.).

La fórmula empleada para este modelo de vulnerabilidad se basa en una función matemática lineal de carácter empírico extraída de estudios experimentales:

$$P_r = a + b \ln V \quad [8.19]$$

en la que:

- Pr: "Probit" o función de probabilidad de daño sobre la población expuesta
- a: constante dependiente del tipo de lesión y tipo de carga de exposición
- b: constante dependiente del tipo de carga de exposición
- V: variable que representa la carga de exposición



El valor «probit» permite determinar el porcentaje de la población expuesta que se verá afectada a un determinado nivel de lesiones o por muerte a causa de una carga de exposición determinada. La Tabla 8.8 muestra la relación entre el número “Probit” y el porcentaje de población expuesta a un determinado nivel de lesiones.

Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%
0	0	3,72	10	4,16	20	4,48	30	4,75	40	5,00	50	5,25	60	5,52	70	5,84	80	6,28	90	7,33	99,0
2,67	1	3,77	11	4,19	21	4,50	31	4,77	41	5,03	51	5,28	61	5,55	71	5,88	81	6,34	91	7,37	99,1
2,95	2	3,82	12	4,23	22	4,53	32	4,80	42	5,05	52	5,31	62	5,58	72	5,92	82	6,41	92	7,41	99,2
3,12	3	3,87	13	4,26	23	4,56	33	4,82	43	5,08	53	5,33	63	5,61	73	5,95	83	6,48	93	7,46	99,3
3,25	4	3,92	14	4,29	24	4,59	34	4,85	44	5,10	54	5,36	64	5,64	74	5,99	84	6,55	94	7,51	99,4
3,36	5	3,96	15	4,33	25	4,61	35	4,87	45	5,13	55	5,39	65	5,67	75	6,04	85	6,64	95	7,58	99,5
3,45	6	4,01	16	4,36	26	4,64	36	4,90	46	5,15	56	5,41	66	5,71	76	6,08	86	6,75	96	7,65	99,6
3,52	7	4,05	17	4,39	27	4,67	37	4,92	47	5,18	57	5,44	67	5,74	77	6,13	87	6,88	97	7,75	99,7
3,59	8	4,08	18	4,42	28	4,69	38	4,95	48	5,20	58	5,47	68	5,77	78	6,18	88	7,05	98	7,88	99,8
3,66	9	4,12	19	4,45	29	4,72	39	4,97	49	5,23	59	5,50	69	5,81	79	6,23	89	7,33	99	8,09	99,9

**Tabla 8.8.** Tabla “Probit” que relaciona el número Pr con el porcentaje de población expuesta a un determinado nivel de lesiones.

La variable dependiente Pr se ha establecido como una variable aleatoria según una distribución estadística normal con un valor medio de 5 y una desviación tipo (desviación estándar) de 1, lo cual significa que a un porcentaje del 50% corresponde un valor del «probit» = 5.

Este método se puede emplear para determinar el porcentaje de personas afectadas por intoxicación, por radiación térmica y por sobrepresión.

El método «Probit» de vulnerabilidad a radiaciones térmicas se emplea para determinar el porcentaje de personas afectadas por los efectos de las radiaciones térmicas en función de la intensidad de irradiación recibida y del tiempo de exposición (dosis de radiación calorífica recibida).



En el caso de fugas de líquidos y gases inflamables y con una ignición inmediata, se podrá generar un charco ardiendo, una explosión BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) o un chorro con llamarada. Las lesiones ocasionadas serán causadas principalmente por radiaciones térmicas.

Si el gas no se enciende inmediatamente, se dispersará en la atmósfera. Si la nube de gas formada se encuentra con un foco de ignición en sus proximidades, se supone que cualquier persona presente dentro de la nube de gas ardiendo morirá a consecuencia de quemaduras y asfixia. En la zona externa a la nube de gas, aunque la duración de la radiación térmica generalmente será breve, los daños estarán en función de la distancia y habrán de ser evaluados en cada caso.

La institución holandesa TNO (Organización holandesa para la investigación científica) presenta las ecuaciones «probit» siguientes:

- quemaduras mortales (en personas protegidas con ropas):

$$P_r = -37,23 + 2,56 \ln \left( t l^{\frac{4}{3}} \right) \quad [8.20]$$

- quemaduras mortales (personas sin protección):

$$P_r = -36,38 + 2,56 \ln \left( t l^{\frac{4}{3}} \right) \quad [8.21]$$

- quemaduras de 2º grado:

$$P_r = -43,14 + 3,0188 \ln \left( t I^{\frac{4}{3}} \right) \quad [8.22]$$

- quemaduras de 1º grado:

$$P_r = -39,83 + 3,0186 \ln \left( t I^{\frac{4}{3}} \right) \quad [8.23]$$

donde:      t:      tiempo efectivo de exposición (s)  
               I:      intensidad de irradiación (W/m<sup>2</sup>)

En las fórmulas anteriores se ha supuesto que las lesiones ocasionadas se reducen por el factor 7 si se va protegido con ropa. En otras palabras, un porcentaje del 1% en un determinado grado de lesión en personas que utilizan ropas equivale a un 7% en personas que no van protegidas con ropas.

Otra ecuación «Probit» desarrollada por Eisenberg et al. para evaluar el porcentaje de mortalidad por irradiación térmica es la siguiente:

$$P_r = -14,9 + 2,56 \ln \left( \frac{t I^{\frac{4}{3}}}{10^4} \right) \quad [8.24]$$

donde:      t:      tiempo de exposición (s)  
               I:      intensidad de irradiación térmica (W/m<sup>2</sup>)

Estas ecuaciones son útiles para incendios de tipo fogonazo (flash fire) de corta duración, como en el incendio de la bola de fuego ocasionada por una BLEVE y que no da tiempo a escapar, y también para incendios de derrames que forman un charco en llamas en los cuales se intenta escapar y buscar protección detrás de obstáculos. En este último caso se determina el tiempo de exposición efectivo mediante la expresión propuesta por TNO:

$$t_{\text{ef}} = t_r + \frac{3 x_0}{5 \mu} \left[ 1 - \left( 1 + \frac{\mu}{x_0} t_v \right)^{\frac{5}{3}} \right] \quad [8.25]$$

donde:

- $t_{\text{ef}}$ : tiempo de exposición efectivo (s)
- $t_r$ : tiempo de reacción (5 segundos)
- $x_0$ : distancia al centro del incendio (m)
- $\mu$ : velocidad de escape de una persona (m/s)
- $t_v$ : tiempo en llegar a la distancia en la que la intensidad de irradiación sea 1 kW/m<sup>2</sup> (s)



## 8.8 Métodos de prevención de incendios

En la manipulación y almacenamiento de los líquidos combustibles e inflamables existe siempre un momento en que el líquido está en contacto con el aire, excepto cuando el almacenamiento se realiza en recipientes estancos que no se abren ni se llenan en el mismo lugar, o cuando la manipulación se lleva a cabo en sistemas cerrados en los que se recuperan las pérdidas de vapores. Incluso en este último caso, siempre existe la posibilidad de que haya roturas o fugas que permitan el escape. Por todo ello la ventilación tiene importancia primordial para impedir la acumulación de vapores inflamables. También es recomendable eliminar las fuentes de ignición en las cercanías de los puntos donde se emplean, manipulan o almacenan líquidos inflamables que tengan un bajo punto de inflamación, aunque ordinariamente no existan vapores.

En los procesos industriales en que intervienen líquidos inflamables o combustibles, los equipos como compresores, alambiques, torres, bombas, etc. deberán estar situados siempre que sea posible en lugar abierto, para reducir el potencial de incendio creado por fuga y acumulación de vapores inflamables. La gasolina, como casi todos los líquidos inflamables, produce vapores más pesados que el aire, por lo que tienden a situarse cerca del suelo o en pozos o depresiones; tales vapores pueden desplazarse a grandes distancias por el suelo o el terreno y entrar en ignición en algún punto de origen de la emanación. En estos casos, el mejor método de ventilación es la eliminación de tales vapores al nivel del suelo, incluyendo los pozos o depresiones. Las corrientes de



convección del aire caliente o la difusión normal de los vapores pueden elevar incluso los vapores pesados, también puede ser deseable la ventilación por el techo. La ventilación puede ser natural o artificial. Aunque la natural tiene la ventaja de no depender de su iniciación manual o del suministro de energía, no se puede controlar tan fácilmente como la ventilación mecánica al depender de las condiciones de temperatura y viento. Debe utilizarse ventilación mecánica en procesos interiores con líquidos inflamables y combustibles.

### **Desahogo de explosiones**

En habitaciones donde puedan producirse explosiones de vapores inflamables, se recomienda la instalación de sistemas de desahogo, al menos para líquidos inestables y clases IA.

### **Sustitución por líquidos no inflamables**

Los riesgos originados por el empleo de líquidos inflamables pueden evitarse o reducirse sustituyéndolos por otros productos relativamente más seguros. El tricloroetileno, por ejemplo, aunque sea más caro, puede sustituir favorablemente a otros disolventes más peligrosos en algunos casos, puesto que no es inflamable a temperaturas normales. El tetracloroetileno (percloroetileno) es otro líquido no inflamable. Sin embargo, estos productos son tóxicos, y deben emplearse solamente en espacios bien ventilados, con sistemas de recuperación del vapor para evitar que pase a la atmósfera.

Existen en el mercado distintos disolventes estables con puntos de inflamación comprendidos entre 60 y 88 °C con bajo grado de toxicidad.



Hay unos derivados del petróleo especialmente refinados, desarrollados inicialmente con el nombre de "disolventes Stoddard" con propiedades similares a las del keroseno. Su peligro reside en la posibilidad de que se empleen pensando que no presentan riesgo alguno y se descuiden las precauciones normales que se tomarían en el caso de un líquido como el keroseno. Cuando se calientan por encima del punto de inflamación (38 °C) emiten vapores tan inflamables como los de la gasolina a la temperatura de inflamación.





## 8.9 Radiación térmica, criterio de daños

Los principales grados de quemaduras originadas por radiaciones térmicas son los siguientes:

**Primer grado.** Nivel medio de quemaduras de piel, caracterizado por eritemas, pero sin formación de ampollas. Las quemaduras de primer grado suave no son dolorosas y normalmente el paciente no necesita asistencia médica. Solamente presenta como síntomas una sensación de calor moderado. Las de grado severo producen algún dolor, pero no un daño permanente. Se forman escamas o costras en la piel varios días después de la exposición resultando dañada la capa de piel exterior.

**Segundo grado.** Se trata de un nivel intermedio de quemaduras, caracterizado por la formación de ampollas. Las ampollas son superficiales ocupando solamente la capa de la piel.

**Tercer grado.** Quemaduras profundas, caracterizadas por la destrucción de todas las capas de la piel. El tejido subyacente también es destruido.

Los problemas médicos de quemaduras en grandes partes del cuerpo humano incluyen la pérdida de fluidos y la pérdida de grandes zonas de piel que traen como consecuencia las infecciones.

La supervivencia de personas adultas quemadas y adolescentes puede conseguirse cuando la superficie quemada es inferior al 20 % de la superficie del cuerpo, en quemaduras de segundo y tercer grado (la cabeza ocupa el 7 % del área del cuerpo, los brazos el 14 % y las manos el 5 %), La Tabla 8.9 muestra los efectos de la radiación térmica en en función de los tiempos de exposición y niveles de exposición

<b>kW/m<sup>2</sup></b>	<b>Btu/hr-ft<sup>2</sup></b>	<b>Tiempo de exposición para quemaduras de 1º grado [s]</b>	<b>Tiempo de exposición para quemaduras de 2º grado [s]</b>
1	300	115	663
2	600	45	187
3	1000	27	92
4	1300	18	57
5	1600	13	40
6	1900	11	30
8	2500	7	20
10	3200	5	14
12	3800	4	11

Tabla 8.9. Efectos de la radiación térmica en función de los tiempos de exposición y niveles de exposición

## 8.10 Cálculos experimentales

### Supuesto 1 – Incendio de un derrame masivo de etanol

Calcular el flujo de radiación térmica recibido a una distancia de 25 m, originado por el incendio de un derrame de 24000 kg de etanol producido durante las operaciones de descarga de un contenedor cisterna que ha sido confinado en un cubeto rectangular de dimensiones 30x10 m. Las condiciones atmosféricas se suponen sin viento, una temperatura de 25 °C y una humedad relativa del 60 %.

Los valores de los parámetros de entrada a las simulaciones son los siguientes:

Presión de vapor etanol:	$5,87 \cdot 10^3$ Pa
Calor específico etanol:	$2,427 \cdot 10^3$ J/(kg·K)
Calor latente vap. etanol:	$8,41 \cdot 10^5$ J/kg
Calor combustión etanol:	$297,4 \cdot 10^5$ J/kg
Temperatura de ebullición etanol:	344,8 K
Temperatura ambiente:	298 K
Presión de vapor saturado agua (25 °C):	3130 Pa

El primer paso consiste en calcular el caudal de evaporación de combustión mediante la ecuación [8.10]:

$$m = \frac{8,41 \cdot 10^5}{2,427 \cdot 10^3 (345 - 298) + 8,41 \cdot 10^5} \frac{297,4 \cdot 10^5}{8,41 \cdot 10^5} 10^{-3} = 30,6 \cdot 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$$

Acto seguido, para calcular la altura de la llama, hay que calcular las dimensiones del incendio (se conocen las dimensiones de la base rectangular:  $30 \times 10 \text{ m}^2$ ) y aplicar lo establecido en la ecuación [8.11].

Para una superficie de  $300 \text{ m}^2$ , en el caso de ser circular, tendría un radio (llamado radio equivalente  $b_{\text{eq}}$ ) de  $9,77 \text{ m}$ .

$$\text{altura de las llamas } a = 29 \cdot 9,77^{0,7} \cdot (30,6 \cdot 10^{-3})^{0,6} = 17,8 \text{ m}$$

Una vez conocido el valor de la altura de las llamas, se puede pasar a calcular (para un incendio rectangular) el factor de visión geométrico, tomando como referencia la Tabla 8.4 y la Figura 8.2.

$$\frac{a}{b} = \frac{17,8}{30} = 0,59$$

$$\frac{b}{c} = \frac{9,77}{25} = 0,39$$

$$\frac{a}{c} = \frac{17,8}{25} = 0,71$$

$$\frac{c}{b} = \frac{25}{30} = 0,83$$

Factor de visión horizontal (Tabla 8.4)  $F_h = 0,04235$

Factor de visión vertical (Tabla 8.4)  $F_v = 0,078$

$$\text{Factor de visión máximo } F_{\max} = \sqrt{F_h^2 + F_v^2} = \sqrt{0,04235^2 + 0,0780^2} = 0,0833$$

Por otro lado, para determinar la irradiación que puede recibir una persona a 25 m de distancia del incendio hace falta determinar el coeficiente de transmisión atmosférica  $d$  el cual puede ser determinado por la fórmula empírica propuesta por Pietersen y Huerta:

$$d = 2,02 (P_v c)^{-0,09} = 2,02 \left( \frac{3130 \cdot 60}{100} 25 \right)^{-0,09} = 0,77$$

La intensidad media de radiación de la superficie de las llamas de etanol, según la Tabla 8.5 y las consultas bibliográficas es de 23 (kW/m<sup>2</sup>), por lo que la radiación que recibirá una persona u objeto en posición vertical a los 25 m será de:

$$q = d F_v E = 0,77 \cdot 0,078 \cdot 23 = 1,38 \text{ kW / m}^2$$

El uso del programa informático APPO para este mismo supuesto, aporta las siguientes ventajas:

- Da la información global de todo el proceso: evaporación "flash", influencia de la temperatura y tipo de suelo, radiación solar y velocidad del viento.
- Mayor rapidez de cálculo.
- Más seguridad en las operaciones matemáticas (no equivocaciones).

- Aporta las constantes físico-químicas de la materia peligrosa implicada en el accidente que son necesarias para realizar los cálculos.
- Los resultados junto con los "datos de inicio" aparecen todos en una misma pantalla: toda la información en un único campo visual.
- Permite enlazar los resultados a posibles nuevas situaciones: área del derrame, incendio, explosión, etc.
- 

El Esquema 8.1 muestra la pantalla de entrada y salida de datos del modelo APPO para calcular el flujo de radiación térmica recibida a una distancia de 25 m. originada por el incendio de un derrame de 24.000 kg de etanol.

**ETANOL** **Nº ONU: 1170** **FICHA DE SEGURIDAD**

Archivo Consultas Emergencias NTP Recursos ?

**Cantidad en combustión**

masa  [kg]

volumen  [litros]

Área derrame en combustión  [m<sup>2</sup>]

Temperatura ambiente  [°C]

Humedad relativa aire  [%]

Zona de Intervención  [m]

Zona de Alerta  [m]

**Vulnerabilidad [PROBIT]**

[minutos]  [m] distancia - [m]

Intensidad de radiación [kW/m<sup>2</sup>]

valor "Probit"

<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	% de población con ropa afectada por quemaduras mortales
<input type="text" value="0,5611"/>	<input type="text" value="1"/>	% de población sin protección afectada por quemaduras mortales
<input type="text" value="0,4216"/>	<input type="text" value="1"/>	% de población afectada por quemaduras de 2º grado
<input type="text" value="3,7287"/>	<input type="text" value="11"/>	% de población afectada por quemaduras de 1er. grado


Tasa de combustión  [kg/(s·m<sup>2</sup>)]

Área de la llama  [m<sup>2</sup>]

Altura teórica de la llama  [m]

Intensidad media de radiación en la llama  [kW/m<sup>2</sup>]

Duración del incendio  [s]  [min]



**SALIR**

**Esquema 8.1.** Pantalla de entrada y salida de datos del modelo APPO para calcular el flujo de radiación térmica recibida a una distancia de 25 m. originada por el incendio de un derrame de 24.000 kg de etanol.

## Supuesto 2 – Modelo de vulnerabilidad “Probit” para incendios

En base a los resultados obtenidos en el supuesto 1 de este capítulo, calcular el tiempo  $t$  que debe de estar expuesta la población (a 25 m de distancia de las llamas) para que un 10 % de esta sufra quemaduras de 1º grado debido a la radiación térmica.

El primer paso consiste en determinar mediante la Tabla 8.8 la función de probabilidad “Probit” correspondiente a un 10 % de población que sufre lesiones:

$$Pr = 3,72$$

Acto seguido, basta aplicar la ecuación [8.23] para determinar el tiempo  $t$  de exposición efectiva para que se produzcan tales lesiones.

$$3,72 = -39,83 + 3,0186 \ln \left( t \cdot 1380^{\frac{4}{3}} \right) \quad \therefore \quad t = 119,8 \text{ s}$$

Es Esquema 8.2 muestra la pantalla de entrada y salida de datos del modelo APPO para calcular el tiempo que debe estar expuesta la población (a 25 m de distancia de las llamas) para que un 10 % de ésta sufra quemaduras de primer grado debido a la radiación térmica.

SAPPO

Archivo Consultas Emergencias NTP Recursos ?

**ETANOL** **Nº ONU: 1170** **FICHA DE SEGURIDAD**

Derrame de líquidos

Derrame de un gas

Área de un derrame

Evaporación de derrames

Combustión de derrames

Jet-flame

BLEVE

Explosiones

SALIR

**Cantidad en combustión**

masa  [kg]

volumen  [litros]

Área derrame en combustión  [m<sup>2</sup>]

Temperatura ambiente  [°C]

Humedad relativa aire  [%]

Tasa de combustión  [kg/(s·m<sup>2</sup>)]

Área de la llama  [m<sup>2</sup>]

Altura teórica de la llama  [m]

Intensidad media de radiación en la llama  [kW/m<sup>2</sup>]

Duración del incendio  [s]  [min]

Zona de Intervención  [m]

Zona de Alerta  [m]

**Vulnerabilidad [PROBIT]**

[minutos]

distancia - [m]

Intensidad de radiación [kW/m<sup>2</sup>]

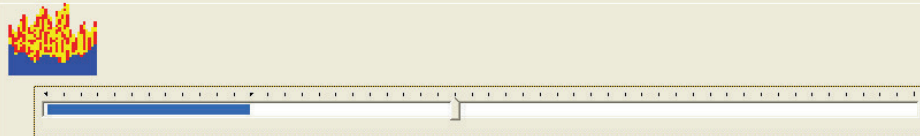
valor "Probit"

% de población con ropa afectada por quemaduras mortales

% de población sin protección afectada por quemaduras mortales

% de población afectada por quemaduras de 2º grado

% de población afectada por quemaduras de 1er. grado



**Esquema 8.2.** Pantalla de entrada y salida de datos del modeloAPPO para calcular el tiempo que debe estar expuesta la población (a 25 m de distancia de las llamas) para que un 10 % de ésta sufra quemaduras de primer grado debido a la radiación térmica.



**BLEVE.**  
**Bolas de fuego.**

CAPITULO  
**9**



## 9.1 Introducción

El termino BLEVE fue utilizado por primera vez en el año 1957 por los ingenieros norteamericanos James B. Smith, Williams S. Marsh y Wilbur L. Walls cuando investigaban las causas de la rotura de un recipiente de acero utilizado para la producción de resina fenólica a partir de la formalina y fenol.

A raíz del descubrimiento del fenómeno físico (aparentemente no requiere de ningún tipo de reacción química), se desarrolló un modelo capaz de explicar una serie de accidentes ocurridos en el pasado, que hasta el momento no se les había encontrado explicación.

Se define la BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) como la explosión causada por la expansión de los vapores de un líquido que está en ebullición, el cual a su vez suele provocar la ruptura (en dos o mas pedazos) del recipiente que lo contiene, con la consecuente proyección de fragmentos a grandes distancias, un inmenso frente de fuego con grandes distancias en su entorno y elevación (bola de fuego), acompañado de la correspondiente radiación calorífica y onda expansiva. La bola de fuego resultante adopta una forma y dimensiones muy variables dependiendo de las características físico-químicas del fluido inflamable involucrado.

Para que se produzca la BLEVE, deben darse las tres condiciones siguientes:

- Tiene que tratarse de un gas licuado o un líquido **sobrecalentado** a presión (la fase líquida debe estar sobrecalentada).
- Que se produzca una **bajada brusca de la presión** en el interior del recipiente, condición que puede ser originada por impactos, rotura o fisura del recipiente, actuación de los discos de ruptura o válvulas de alivio (de seguridad) con diseño inadecuado.
- Que se den las condiciones de presión y temperatura que permitan que se pueda producir el fenómeno de **nucleación espontánea**; con esta condición se origina una rapidísima evaporación de toda la masa del líquido en forma de flash, generada por la rotura del equilibrio del líquido como consecuencia del sobrecalentamiento del líquido o gas licuado.

### Líquido sobrecalentado bajo presión

Todos los líquidos tienen una temperatura a la que empiezan a hervir y a emitir vapores (temperatura de ebullición), la cual varía en función de la presión a la que se ve sometido.

En el caso de los gases licuados, al aumentar la presión para almacenarlos, aumenta también su punto de ebullición. Ahora bien, cuando se reduce la presión de almacenamiento a la presión atmosférica, toda la fase líquida puede pasar a la fase gaseosa, hervir y evaporarse a temperatura ambiente. A este tipo de líquidos se les suele denominar "**sobrecalentados**".

Si estos "gases licuados" entran en contacto con fuentes de calor, la presión de la fase gaseosa aumentará, lo cual se traduce en un aumento de la presión del líquido, y por tanto también de su punto de ebullición. Dicho equilibrio (en forma de círculo vicioso) se

mantendrá estable siempre que el recipiente sea capaz de mantener su estanqueidad o su resistencia mecánica.

Como conclusión, los productos capaces de ocasionar BLEVES se clasifican en dos grandes categorías:

- Todos los gases licuados almacenados a temperatura ambiente, inflamables o no (GLP, amoníaco, cloro, etc.).
- Los líquidos que accidentalmente entran en contacto con fuentes de calor.

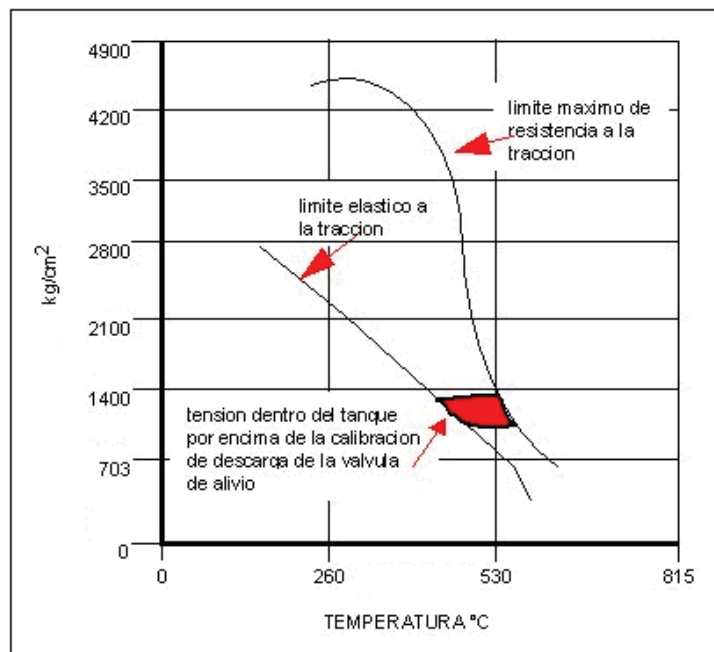
### **Bajada brusca de presión**

Otra condición necesaria, pero no suficiente para que se produzca la BLEVE, es que dentro del recipiente (depósito, etc.) que contiene el líquido, se produzca un descenso brusco de la presión, debido a algún fallo estructural del recipiente, fisura u oquedad producida por:

- **causas mecánicas** como puede ser un impacto, choque o vuelcos de la cisterna bajo presión en su transporte. Es importante aclarar que esto no ocurrirá con los líquidos inflamables y combustibles que no están presurizados, ya que ante un incidente por fallos mecánicos, choques o impactos, etc. a lo sumo se producirá el derrame del producto.
- **causas térmicas.** Por ellas también se da la rotura, etc. de depósitos, tanques y similares; así por ejemplo, la resistencia del acero al carbono disminuye gradualmente al aumentar la temperatura por encima de los 204 °C. Las curvas varían dependiendo de los diferentes aceros usados en la construcción de recipientes, pero el efecto de la pérdida de resistencia es relativamente similar con

el aumento de temperatura en los metales comunes, inclusive a temperaturas no tan críticas como las que se desarrollan en un incendio.

En el caso de los aceros utilizados comúnmente en la construcción de tanques para GLP, pueden colapsar a presiones de 14 a 20 kg/cm<sup>2</sup> por calentamiento de la chapa entre los 650 a 700 °C, debido a que la resistencia se reduce en un 30% comparativamente a temperaturas normales (Gráfico 9.1).



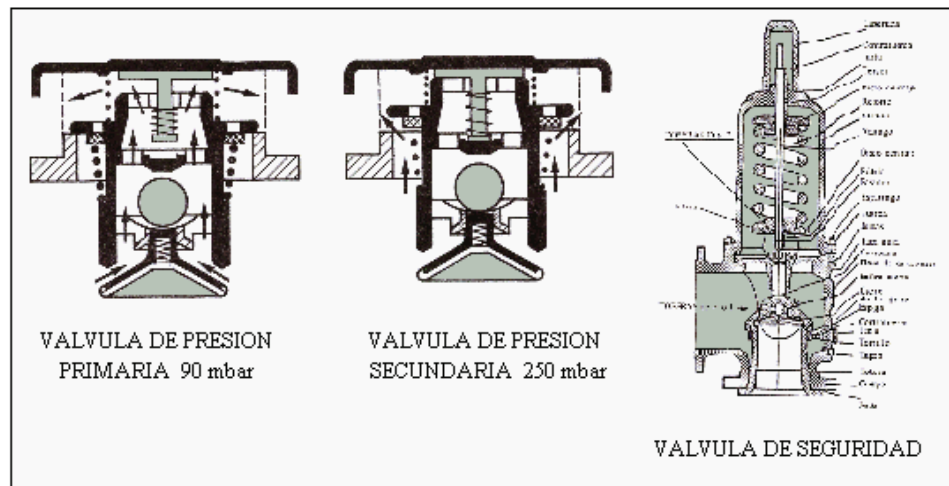
**Gráfico 9.1.** Comportamiento de un recipiente de acero al carbono para GLP con exposición al fuego.

El calor transferido al tanque tiene un doble resultado: en primer lugar el debilitamiento de la estructura metálica del mismo y en segundo lugar el incremento de la presión interna del líquido, el cual puede obligar a que entren en funcionamiento los dispositivos de alivio de presión (válvulas y discos), que originarían un descenso brusco de la presión, pudiendo dar lugar a una BLEVE.

A pesar de que hasta el momento no se cuenta con información puntual que documente que alguna BLEVE se haya producido a causa de un mal dispositivo de alivio (ver Figura 9.1 – válvulas de alivio), es importante desarrollar dos posibilidades que de presentarse al mismo tiempo, "pueden" dar lugar a la misma:

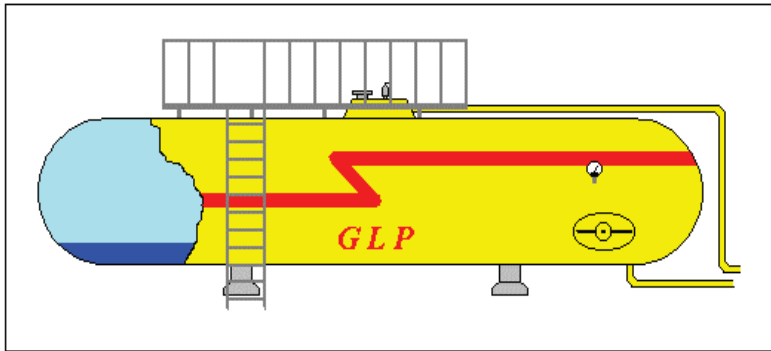
- Que el sistema de alivio esté calibrado a una presión superior al punto crítico (presión por encima de la cual la temperatura es más elevada a la de la línea de sobrecalentamiento) pudiéndose dar una nucleación espontánea.
- Que el dispositivo sea de gran caudal, lo que originara en muy pocos instantes la evacuación de gran cantidad de producto, dando lugar a una caída brusca de presión. Esto puede ocurrir con un disco de ruptura, y no con una válvula de alivio.

La Figura 9.1 muestra un ejemplo de válvulas de alivio



**Figura 9.1.** Válvulas de alivio.

Los depósitos de GLP usados para la calefacción de muchas viviendas (Figura 9.2) y que no someten a inspección sus equipos de alivio son candidatos a este tipo de BLEVE.

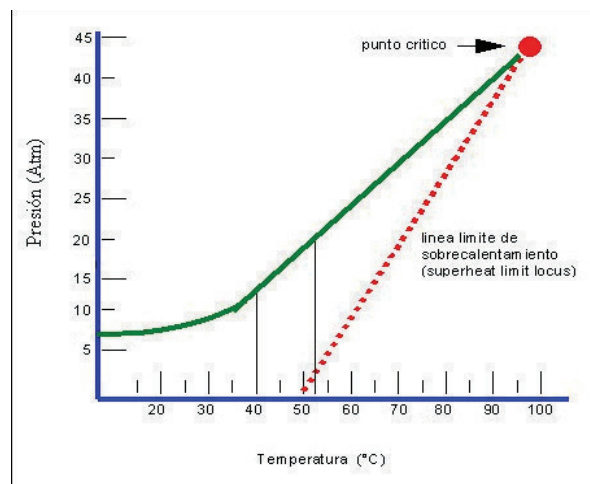


**Figura 9.2.** Depósito de almacenamiento de GLP.

### Nucleación espontánea.

Condición específica para que ocurra una explosión BLEVE es que una evaporación en masa tipo *flash* en milésimas de segundo, que hace de desencadenante del fenómeno.

La Gráfica 9.2 muestra la Línea límite de sobrecalentamiento y curva de presión de vapor para el propano



**Gráfica 9.2.** Línea límite de sobrecalentamiento y curva de presión de vapor para el propano.

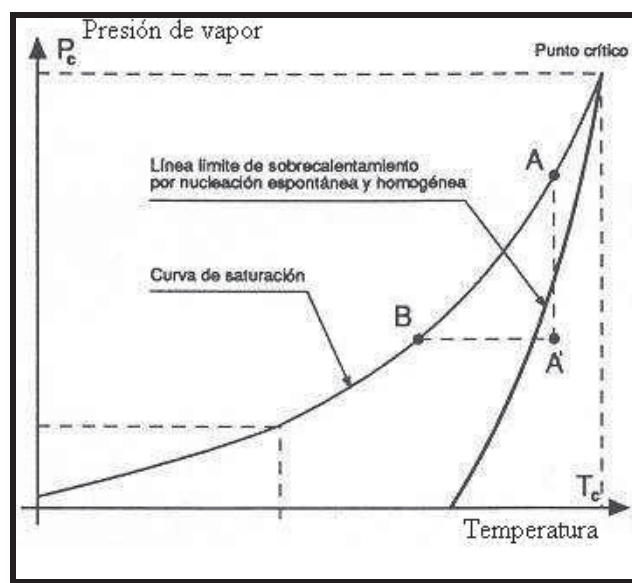
El mecanismo de esta explosión, se explica partiendo previamente del fenómeno de vaporización en las distintas condiciones de presión y temperatura, y estudiando las gráficas en las que se relaciona la presión con la temperatura; en cuyas curvas están señaladas las líneas límite de (Gráfico 9.2).



## 9.2 Termodinámica de la BLEVE

Cualquier líquido o gas licuado almacenado en el interior de un recipiente cerrado se encuentra en las dos fases, líquido y vapor, en situación de equilibrio según la curva de saturación presión-temperatura de la gráfica 9.3, o sea que a cada temperatura del líquido le corresponde una determinada presión de vapor, que es la que está soportando la pared interior del recipiente expuesto a la fase vapor.

La Gráfica 9.3 muestra unas curvas de presión-temperatura típicas.



Gráfica 9.3. Curva de saturación P-T.

A medida que aumenta la temperatura, aumenta obviamente la presión de equilibrio, hasta alcanzarse el punto crítico, a partir del cual solo es posible la existencia de la fase gaseosa. Por ello se define la temperatura crítica ( $T_c$ ) como aquella temperatura máxima a la que se puede licuar un gas, y la correspondiente presión crítica ( $P_c$ ) es la presión de vapor máxima que puede tener un líquido.

Precisamente, y tal como hemos dicho, la BLEVE es provocada originariamente por un descenso brusco de la presión a temperatura constante por las causas ya expuestas.

Para comprender la situación de inestabilidad de los líquidos sobrecalentados, es necesario analizar el comportamiento de los gases licuados según la ecuación de Van der Waals [9.1]:

$$\left(p + \frac{3}{v^2}\right)(3v - 1) = 8t \quad [9.1]$$

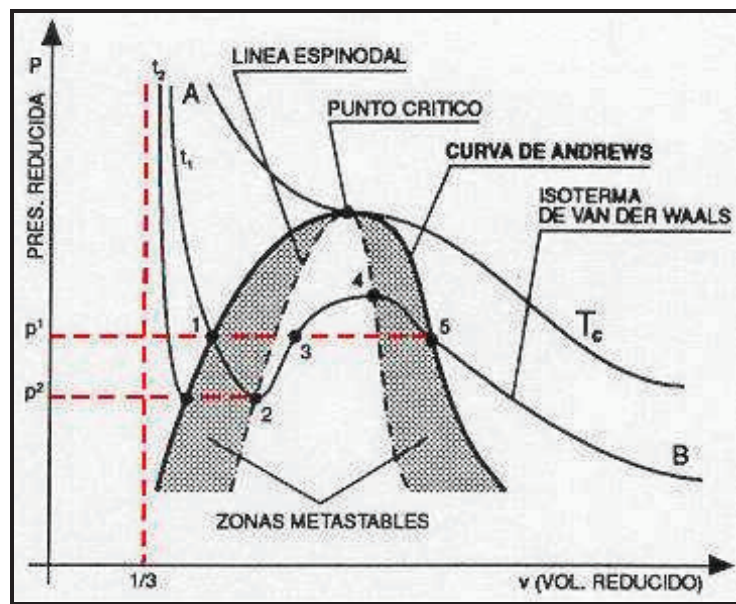
en donde:

$$p = \frac{P}{P_c} \quad v = \frac{V}{V_c} \quad t = \frac{T}{T_c}$$

siendo:	P:	presión
	p:	presión reducida
	V:	volumen
	v:	volumen reducido
	T:	temperatura absoluta
	t:	temperatura reducida
	$P_c$ , $V_c$ y $T_c$ :	constantes críticas

Esta ecuación, que se representa en la Gráfica 9.4 muestra para cada isoterma la relación existente entre presión y volumen para un gas licuado tipo. En dicho diagrama se representan los dos posibles estados de inestabilidad (estados metaestables), el del líquido sobrecalentado y el del vapor subenfriado, que corresponden respectivamente, para la isoterma representada, al tramo 1-2 y 4-5. Precisamente, en estos puntos límites de inestabilidad 2 y 4, les corresponde un mínimo y un máximo de la ecuación de estado, por lo que en ellos la pendiente de la tangente a la curva es cero.

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_{t=\text{cte}} = 0$$



**Gráfica 9.4.** Curvas P-T-V para gases licuables

La línea que une los diferentes puntos límite de inestabilidad para líquidos sobrecalentados y vapores subenfriados se suele denominar línea espinodal, y las zonas de metaestabilidad quedan delimitadas entre dicha curva espinodal y la curva binodal (o de Andrews) la cual separa el área en la que existen dos fases, vapor y líquido, de las áreas en que sólo existe una sola fase (líquido o vapor). En el punto crítico, la línea

binodal y espinodal coinciden con tangente común, que es precisamente la tangente a la curva de presión de vapor en dicho punto crítico.

Cabe reseñar que respecto a la posible BLEVE, no toda la zona de metaestabilidad de líquidos sobrecalentados entraña riesgo, ya que precisamente éste se concreta al alcanzar los mínimos de la curva de Van der Waals en los que irremisiblemente el líquido sobrecalentado se vaporiza súbitamente con una nucleación homogénea.

Para determinar el límite de sobrecalentamiento en el que se produce la nucleación espontánea y consecuentemente la BLEVE, habría que obtener los diferentes puntos de la curva espinodal que permitieran representarla. Dado que la tangente a esta curva en el punto crítico estará siempre en la gráfica a la izquierda de tal tramo de la misma, suele admitirse según los estudios más recientes que dicha recta tangente constituye el límite de seguridad con un margen suficientemente amplio.

Según datos experimentales, se ha comprobado que la diferencia entre el límite real de sobrecalentamiento que podría provocar la BLEVE, y el límite establecido por la tangente a la curva de saturación en el punto crítico y a presión atmosférica oscila entre 20 y 35 °C.

La curva de saturación del diagrama presión de vapor-temperatura se asimila a la ecuación de Antoine, que es una aproximación de la de Clausius Clapeyron, según la cual:

$$\ln P = -\frac{A}{T} + B \quad \therefore \quad P = e^{\frac{-A}{T} + B} \quad [9.2]$$

siendo: P: presión de vapor (atm).  
T temperatura absoluta (K).  
A y B: constantes para cada compuesto.

La tangente a dicha curva de saturación en el punto crítico se obtiene calculando la derivada de la presión respecto a la temperatura en dicho punto:

$$\frac{dP}{dT} = P \frac{A}{T^2} \quad [9.3]$$

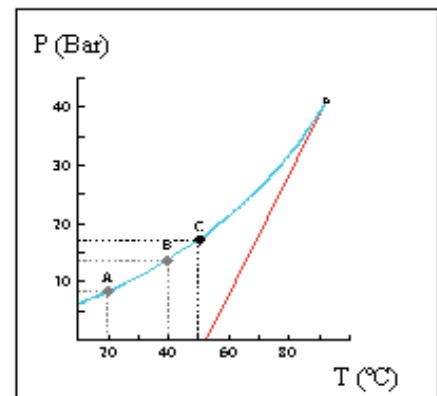
y en el punto crítico:

$$\frac{dP_c}{dT_c} = P_c \frac{A}{T_c^2} = \operatorname{tg} \alpha \quad [9.4]$$

Un ejemplo: el propano, que es uno de los gases licuados más habituales en la industria y en gran número de hogares, se almacena habitualmente a temperatura ambiente (20°C) y a una presión de 8 bares. En las Gráficas 9.5 y 9.6, se representan los puntos en los que existe un equilibrio entre la temperatura y la presión de vapor (es la llamada Curva de Vapor), así como se representa una recta en la que a partir de la cual las condiciones de temperatura y presión de vapor pueden hacer posible la evaporación instantánea de toda la fase líquida.

En el punto A de las Gráficas 9.5 y 9.6, se representan las condiciones normales de almacenamiento para el propano, que son 20 °C y a 8 bares de presión.

Cuando el depósito se ve afectado por un foco de calor, aumenta la temperatura de las fases gas y líquido. Conforme aumenta la temperatura del líquido, nos desplazaremos por la curva hacia la derecha, de manera que se podrán ir haciendo



**Gráfica 9.5.** curva de presión de vapor

lecturas de la presión y temperatura hasta llegar a un momento en el que se alcanzan temperaturas superiores a los aproximadamente 53°C (el punto C corresponde a 50 °C y 16-17 bar de presión), que es donde empiezan a darse las condiciones de sobrecalentamiento a presión atmosférica.

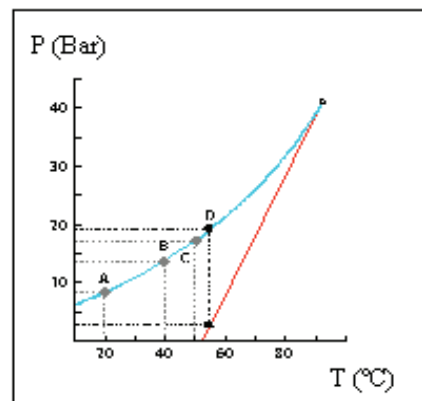
Si en este momento, se produce una rotura del recipiente, de manera que se consiga bajar la presión de forma casi instantánea hasta la presión atmosférica, sí se producirá la BLEVE.

Si sigue aumentando la temperatura, se llegará por ejemplo al punto D (55 °C y 19 bar) en el que una rotura del depósito llevaría directamente a una vaporización súbita de su contenido.

Hay que señalar, que la violencia de la BLEVE, viene dada por el tipo de gas que contiene (en el caso del propano líquido, una unidad de volumen de propano líquido es capaz de generar 280 unidades de volumen de vapor; para el caso de

líquidos inflamables, la vaporización súbita en caso de BLEVE suele ser del orden del 10 %, para los gases criogénicos suele estar en orden del 25 %; y del orden de 50% para gases no criogénicos), y por la diferencia entre la presión de vapor del punto donde se halle en equilibrio en aquel momento y la correspondiente presión del punto de corte de la línea de sobrecalentamiento. Es curioso comprobar, que las explosiones BLEVE son más violentas si la presión y temperatura son inferiores a la del punto crítico, aunque si bien es cierto, que la energía acumulada en la zona del punto crítico sea mayor.

Se debe recordar también, que es muy difícil calentar una cisterna en la zona donde se encuentra la fase líquida, ya que el calor es absorbido por el líquido y disipado por toda la cisterna (como un refrigerante) que actúa como regulador térmico. En el caso del Propano, las válvulas de sobrepresión empezarán a descargar cuando la temperatura del



**Gráfica 9.6.** curva de presión de vapor

líquido alcance los 50 ó 60 °C, con lo que la temperatura del metal estará muy por debajo de su punto de rotura.

Sin embargo, si se calienta el metal por la zona de la fase gaseosa, como el gas es mal conductor térmico, será el metal el que soporte todo el aumento de la temperatura. Normalmente, en la mayor parte de las BLEVES, la ruptura se produce por la parte metálica de la fase gas, y se caracteriza por una deformación del metal con la consiguiente reducción del espesor y aparición inmediata de una grieta longitudinal que crece progresivamente hasta que alcanza una magnitud crítica. En este punto, el metal se hace frágil y se rompe en dos o más pedazos.

En resumen, se puede decir que si surge una ruptura violenta (BLEVE), es probable que en los primeros 150-180 metros colindantes con el contenedor de GLP se produzca una bola de fuego. En los siguientes 150-180 metros se pone de manifiesto el calor radiante de la bola de fuego. Los fragmentos del contenedor, en ocasiones de gran tamaño, pueden ser trasladados a más de 370 m y causar incendios más allá de dicho perímetro.

Normalmente al producirse estas expansiones, se forman las típicas bolas de fuego (para el caso de los líquidos inflamables y combustibles) donde un porcentaje del líquido sale despedido de la zona de la explosión a alta velocidad. Parte de este producto no llega a alcanzar su temperatura de ignición, yendo a caer a grandes distancias en estado líquido y frío. Hubo casos de encontrar el pavimento de asfalto fundido a 800 metros del sitio de la BLEVE. En otros casos, comentarios hechos por los bomberos que combatían un incendio en el momento en el que se produjo la BLEVE, manifestaron que sintieron cierto el frescor al pasar cerca de ellos el gas licuado y frío.

## Sistemas modernos de prevención de BLEVES

Los aspectos puntuales en el campo de investigación actual sobre sistemas de prevención que ayuden a evitar la ocurrencia de estos fenómenos son los siguientes:

- **Estudio de nuevos diseños de discos de ruptura y válvulas de seguridad (alivio).**

Es importante resaltar que hasta el momento, a ningún siniestro se le ha podido catalogar como ocurrido a consecuencia de un dispositivo de alivio. Se manejan algunas hipótesis de su posibilidad, como así también que estos dispositivos pueden, en cierta manera, retrasar la BLEVE en las sucesivas descargas pero no evitarla.

En función de los conocimientos adquiridos por las teorías de la nucleación espontánea, se aconseja el rediseño de los sistemas de alivio no en base a las calibraciones estándar, sino en calibrar las válvulas de seguridad para que actúen a una presión más baja que las correspondientes a la línea límite de sobrecalentamiento.

Respecto a los discos de rupturas, se recomienda la colocación de varios, no de uno solo como comúnmente se realiza, y que ellos actúen a distintas presiones y distintas capacidades de desalojo, evitando la súbita caída de presión a una atmósfera.

Los dispositivos no deben ser de aplicación general, ya que se deberá realizar el estudio y diseño para cada caso de gas licuado o líquido, etc. en concreto.



- **Colocación en el interior de los recipientes mallas que retarden la aparición de la BLEVE.**

Actualmente existen dos sistemas de retardo de aparición de BLEVES basados en mallas introducidas dentro de los recipientes; uno de origen Canadiense el otro Alemán.

Se trata de mallas de aluminio, en forma de pequeñas celdillas hexagonales que pueden formar capas compactas dentro del producto, cubriendo todo su volumen y consiguiendo tres efectos:

- En el caso de que un recipiente sea atacado por un fuego exterior, la malla reparte el calor en todo el interior, evitando la formación de las temidas fisuras donde comienzan el colapso del recipiente.
- Como se menciona anteriormente al distribuir homogéneamente el calor, principalmente en la fase gaseosa, la malla evita el aumento de presión de la cámara en donde se encuentran los vapores (parte superior de la cisterna).
- En caso de encontrarse dentro del recipiente aire en los límites de explosividad, esta malla también evitaría la posible explosión por detonación de la mezcla explosiva, debido a que como se ha mencionado, favorece la distribución homogénea del calor generado y el apagado de la llama.

Lamentablemente estos dispositivos tienen algunos aspectos desfavorables:

- Su alto coste.
- Se pierde el 2% del volumen real del recipiente.
- Aumento del peso muerto en unos 1500 Kg. (conforme al peso de una cisterna de 40 m<sup>3</sup>).
- Problemas de falta de fluidez en líquidos viscosos.

- Complica las reparaciones y revisiones del tanque.
- **Adición de núcleos iniciadores de ebullición para evitar la nucleación espontánea.**

Esta es un área todavía en experimentación. Se han observado de momento buenos resultados en la adición al fluido de ciertos geles o líquidos preparados para que se comporten como tales, dispersados homogéneamente en toda la masa del líquido con el objetivo de evitar la nucleación espontánea.

- **Capacidad de vaciado rápido del recipiente afectado**

Es necesario prever la evacuación rápida del contenido del recipiente en el caso de una posible rotura, fisura, cualquier fuga incontrdada o por estar expuesto a una importante radiación térmica.

Ello requiere disponer de depósitos vacíos en zona segura, interconectados a una red de tuberías de vaciado. Estas tuberías deberían estar protegidas contra incendios y disponer de válvula de bloqueo con control remoto.

A fin de evitar accidentes muy graves sucedidos por escapes incontrolados en la tubería de purgado de agua del fondo de los recipientes, por congelamiento de la válvula de cierre, hay que mencionar también las siguientes medidas preventivas:

- Selección o instalación de las adecuadas válvulas de purga. La existente inmediatamente a la salida del recipiente será calorifugada y del tipo de cierre rápido. En lugares de temperatura inferiores a 0 °C debería existir una válvula adicional conectada a ese tramo de tubería para su vaciado,

evitando la retención de agua. La segunda válvula de control de purga estará distanciada de la primera.

- Tubería de purgado de pequeño diámetro (máximo 3/4") conducida al sistema de desagüe.

- **Control riguroso del grado de llenado de los recipientes**

Es una medida de seguridad fundamental, no sobrepasar nunca el llenado máximo permitido por normativa, el cual está en función de las características del fluido y de sus condiciones de almacenamiento.

Ningún recipiente es capaz de resistir la sobrepresión que se genera sobre sus paredes interiores a causa de la dilatación del propio líquido al aumentar la temperatura. Por este motivo el depósito debe estar dotado de los adecuados sistemas de regulación y control del nivel de llenado.

- **Cubetos de retención**

Si bien el cubeto de retención tiene la misión fundamental de retener un derrame accidental del o de los depósitos existentes en su interior, para evitar la propagación de incendios por la sustancia derramada, cabe destacar la necesidad de que dichos cubetos cuenten con un sistema de desagüe que permita su rápido vaciado y traslado del fluido derramado a un contenedor seguro.

- **Refrigeración de los recipientes con agua**

Esta medida es imprescindible para evitar el impacto térmico sobre la superficie de todo recipiente expuesto a fuego directo o a los efectos de radiación térmica de una BLEVE o incendio generado en un área próxima.

El agua contra incendios deberá rociar todo el depósito pero en especial su parte superior en contacto con la fase vapor en donde pueden alcanzarse fácilmente temperaturas críticas.

Tal rociado de agua deberá formar parte de la instalación fija de agua contra incendios. Su aplicación podrá ser mediante cualquiera de los sistemas habituales:

- Instalación de rociados automáticos (sprinklers) a través de una red envolvente que pulverice el agua sobre toda la superficie del depósito.
- Instalación de rociado automático desde la parte superior. Si bien el primer sistema permite una mejor distribución del agua, es fácilmente vulnerable ante un incendio; en cambio el segundo al disponer de una sola tubería es más fácil de proteger.

- **Aislamiento térmico del recipiente**

Mediante la aplicación de los diferentes sistemas de aislamiento se podrá limitar la propagación de altas temperaturas por incendios.

El enterramiento es obviamente el sistema más seguro de aislamiento.

Los sistemas de revestimiento son muy diversos, tales como: lanas de vidrio, hormigones especiales, pinturas intumescentes, etc.

### Un ejemplo: "Los Alfaques" (11 de julio de 1.978)

El 11 de julio de 1.978 un camión cisterna de 44,4 m<sup>3</sup> de capacidad cargado con 23619 kg de propileno licuado (carga máxima autorizada: 19350 kg) explotó en los Alfaques (Montsià) causando más de 200 muertes.

La sobrecarga de la cisterna, unido a la elevada temperatura ambiental del momento (mes de julio) provocó que la fase líquido aumentase de volumen. En el interior de la cisterna la masa total del propileno ( $m_{\text{total}}$ ) es constante y se corresponde a la suma de la masa en estado líquido y la masa en estado vapor:

$$m_{\text{total}} = m_{\text{líquido}} + m_{\text{gas}}$$

Así mismo, a una temperatura fija y constante, ocurrirá lo mismo con los volúmenes:

$$V_{\text{total}} = V_{\text{líquido}} + V_{\text{gas}}$$

Combinando ambas relaciones con sus respectivas densidades se obtiene la siguiente expresión, en la que se observa que un aumento de la temperatura repercute directamente sobre el volumen de la fase gas, pues la densidad de la fase líquido ( $\rho_{\text{líquido}}$ ) y la densidad de la fase vapor ( $\rho_{\text{vapor}}$ ) tenderán a disminuir sus valores.

$$V_{\text{gas}} = \frac{V_{\text{total}} \rho_{\text{líquido}} - m_{\text{total}}}{\rho_{\text{líquido}} - \rho_{\text{gas}}}$$

El numerador de esta expresión siempre será positivo, pues el producto de las variables ( $V_{\text{total}} \rho_{\text{líquido}}$ ) corresponde a la masa total de una cisterna totalmente llena, el cual es mayor que  $m_{\text{total}}$  (la cisterna no iba llena hasta arriba del todo).

Por otro lado, el denominador en este caso también será positivo, dado que ( $\rho_{\text{líquido}}$ ) es mayor que ( $\rho_{\text{gas}}$ ).

Si aumenta la temperatura del sistema por el flujo de calor desde el medio ambiente, tanto ( $V_{\text{total}}$ ) como ( $m_{\text{total}}$ ) no se verán afectados, pero sí las densidades de la fase líquido y de la fase vapor, cuyos valores irán disminuyendo provocando la dilatación de cada una de ellas. Dicha disminución conlleva que el numerador de la expresión disminuya; el producto de las variables ( $V_{\text{total}} \cdot \rho_{\text{líquido}}$ ) irá disminuyendo hasta llegar a tener un valor igual a ( $m_{\text{total}}$ ).

En esta situación en la que el valor del numerador es nulo ( $V_{\text{total}} \rho_{\text{líquido}} = m_{\text{total}}$ ), ya no existe la fase vapor y la cisterna queda llena de líquido. En estas situaciones concretas, un pequeño aumento de temperatura provocaría una dilatación del líquido capaz de superar la presión máxima que aguanta la estructura de la cisterna.

### 9.3 Magnitud de una BLEVE

Aunque la mayoría de los fenómenos BLEVE por rotura de un contenedor se deben a la exposición al fuego, en algunos casos se han originado por corrosión o por un impacto externo. Las roturas por impacto son particularmente frecuentes en accidentes de tráfico en los que se ven involucrados cisternas, vagones de ferrocarril o vehículos de carga. En esos casos, la BLEVE se produce simultáneamente al impacto.

En una ocasión, un vagón-cisterna que contenía 113,5 m<sup>3</sup> de GLP se debilitó seriamente en un descarrilamiento y la explosión se produjo 40 horas después. El vagón se elevó y cambió de lugar sin incidente alguno. Cuando se produjo la rotura la presión interna aumentaba como consecuencia de la elevación de la temperatura ambiente.

La magnitud de la BLEVE depende fundamentalmente del peso de los trozos en que se rompe el recipiente y la cantidad de líquido que se evapora cuando el recipiente falla. Resulta análogo en muchos aspectos al comportamiento de los cohetes en lo que se refiere a la propulsión de las piezas del recipiente. La mayoría de las BLEVE de gas licuado ocurren cuando los recipientes están llenos de líquido entre algo menos de la mitad y tres cuartos de su capacidad. La relación entre la energía liberada y el peso de los trozos del recipiente es de tal magnitud que estos salen despedidos a distancias de hasta media milla (800 m).

El 19 de noviembre de 1984, cerca de Ciudad de Méjico, se produjo un tremendo incidente debido a múltiples BLEVE de gas licuado del petróleo. Según un investigador sueco que cooperó con la NFPA, y contrariamente a los informes publicados inicialmente, el accidente se produjo alrededor de las 5:00 horas en la mañana de un lunes, mientras una estación terminal se llenaba de combustible, procedente de una refinería situada en otra zona del país, mediante un gaseoducto. Un fallo de un componente de la tubería, de 12 pulgadas de diámetro, degeneró en una rotura en la línea de suministro, liberándose una enorme nube de GLP, que se incendió 20 minutos más tarde al alcanzar un punto de ignición en el nivel del suelo. La explosión e incendio resultante provocó 500 muertos. La llama procedente de la tubería rota alcanzó uno de los cuatro depósitos esféricos de 1590 m<sup>3</sup> de capacidad, desencadenándose un BLEVE diez minutos después. Procedentes de los cuatro depósitos esféricos y 48 tanques cilíndricos se detectaron 15 BLEVE en un sismógrafo. Dos depósitos esféricos de 2384 m<sup>3</sup> permanecieron en sus cimientos, pero resultaron severamente dañados. Otros dos depósitos de 1590 m<sup>3</sup> quedaron destrozados. Los 48 tanques cilíndricos resultaron dañados en distinto grado, apareciendo pedazos a 1,1 km.



## 9.4 Parámetros de las bolas de fuego en una explosión BLEVE

En base a los estudios realizados por Fay & Lewis (1977) y por Moorhouse y Pritchard (1982) y por Roberts (1982), los algoritmos utilizados para determinar los parámetros de las bolas de fuego consecuentes de una BLEVE son ecuaciones muy sencillas:

### **Eficiencia de una explosión BLEVE ( $\nu$ )**

La eficiencia de una explosión BLEVE puede estimarse mediante la siguiente ecuación:

$$\nu = 0,27 P_v^{0,32} \quad [9.5]$$

donde:       $\nu$ :      eficiencia de la explosión  
               $P_v$ :      presión de vapor de la sustancia (Pa)

### **Radio máximo de la bola de fuego originada ( $R_f$ )**

El radio máximo de una bola de fuego puede estimarse mediante la siguiente ecuación:

$$R_f = 2,665 m_{kg}^{0,327} \quad [9.6]$$

Una alternativa la establece la norma NTP-293 mediante la siguiente ecuación:

$$R_f = 3,24 m_{kg}^{0,325} \quad [9.6 \text{ bis}]$$

donde:  $R_f$ : radio máximo de la bola de fuego (m)  
 $m_{kg}$ : masa envuelta de fluido (kg)

### Altura máxima de la bola de fuego ( $Z_f$ )

La altura máxima de una bola de fuego puede obtenerse mediante la siguiente ecuación:

$$Z_f = 8,02 \left( \frac{m_{kg}}{0,4536} \right)^{\frac{1}{3}} \quad [9.7]$$

donde:  $Z_f$ : altura máxima de la bola de fuego (m)  
 $m_{kg}$ : masa de fluido envuelta en la explosión (kg)

Otros autores (Bestraten, Turmo) proponen una ecuación todavía más sencilla:

$$Z_f = 0,72 (2 R_f)$$

muy similar esta última a la fijada por la NTP-293

$$Z_f = 0,75 (2 R_f) \quad [9.7 \text{ bis}]$$

### Duración de la bola de fuego ( $T_f$ )

El tiempo de duración de una bola de fuego puede obtenerse mediante la siguiente ecuación:

$$T_f = 1,089 m_{kg}^{0,327} \quad [9.8]$$

y la NTP-293 propone:

$$T_f = 0,852 m_{kg}^{0,26} \quad [9.8 \text{ bis}]$$

donde:  $T_f$ : duración de la bola de fuego (s)  
 $m_{kg}$ : masa total del fluido envuelta en la explosión (kg)

La experiencia demuestra que la duración puede llegar a durar hasta tres minutos para las esferas de gran capacidad.

### Potencia de radiación emitida por la bola de fuego (W)

La potencia de la radiación emitida por una bola de fuego puede estimarse mediante la siguiente ecuación:

$$W = \frac{\Delta H_c m_{kg} \nu 1000}{T_f} \quad [9.9]$$

donde:  $W$ : radiación emitida (W)  
 $\Delta H_c$ : calor de combustión de la sustancia (J/g)

### Radiación o flujo incidente ( $Q_{inc}$ )

Una vez determinado el valor de la radiación emitida (W), el flujo incidente de radiación a una distancia determinada (r) viene dado por la siguiente ecuación:

$$Q_{inc} = \frac{W}{4 \pi r^2} \quad [9.10]$$

donde:  $Q_{inc}$ : flujo de radiación incidente (W/m<sup>2</sup>)  
 r: distancia (m)

Bertratem y Turmo (NTP-293), proponen para la radiación térmica recibida en un punto determinado la siguiente ecuación:

$$Q_{\text{rec}} = d F E \quad [9.11]$$

siendo:

- $Q_{\text{rec}}$ : irradiación recibida ( $\text{kW}/\text{m}^2$ ).
- $d$ : coeficiente de transmisión atmosférica, que es función de la humedad relativa del aire y de la distancia al punto tratado en cuestión;  $d = 2,02 (P'_v \cdot x)^{-0,09}$
- $F$ : Factor geométrico de visión
- $E$ : Intensidad media de radiación ( $\text{kW}/\text{m}^2$ )
- $P'_v$ : presión parcial absoluta del vapor en el aire ambiental (Pa)
- $x$ : distancia entre la envolvente de la bola de fuego y el punto considerado (m)

En el caso de BLEVES, al asimilarse la bola de fuego a una esfera y el cuerpo receptor a una superficie normal a la radiación directa en la línea procedente del centro de la esfera, se demuestra que el factor geométrico  $F$  (depende de la forma del foco emisor y receptor, y de la distancia) tiene el valor:

$$F = \frac{D^2}{4 x^2} \quad [9.12]$$

siendo:

- $D$ : diámetro máximo de bola de fuego (m).
- $x$ : distancia entre el centro de la esfera y el cuerpo irradiado (m).

La intensidad media de radiación  $E$  es el flujo radiante por unidad de superficie y tiempo, y se calcula según la siguiente expresión:

$$E = \frac{f_r m_{kg} \Delta H_c}{\pi D^2 t} \quad [9.13]$$

siendo ( $f_r$ ) un coeficiente de radiación que puede oscilar entre 0,25 y 0,40. El coeficiente ( $f_r$ ) indica la fracción de la energía total desarrollada en la combustión, ya que esta energía se ve reducida por las pérdidas, fundamentalmente en la convección de humos.

$m_{kg}$ : masa total del combustible (kg).

$\Delta H_c$ : calor de combustión (kJ/kg).

D: diámetro máximo de la bola de fuego (m).

t: tiempo de duración de la BLEVE (s).

Una vez calculada la irradiación térmica, hay que proceder al cálculo de la dosis de radiación térmica para personas expuestas. Una de las fórmulas más empleadas es la de Eisenberg:

$$\text{Dosis} = t Q_{inc}^{\frac{4}{3}} \quad [9.14]$$

en la que: t: tiempo de exposición (s).

$Q_{inc}$ : irradiación recibida ( $W/m^2$ ).

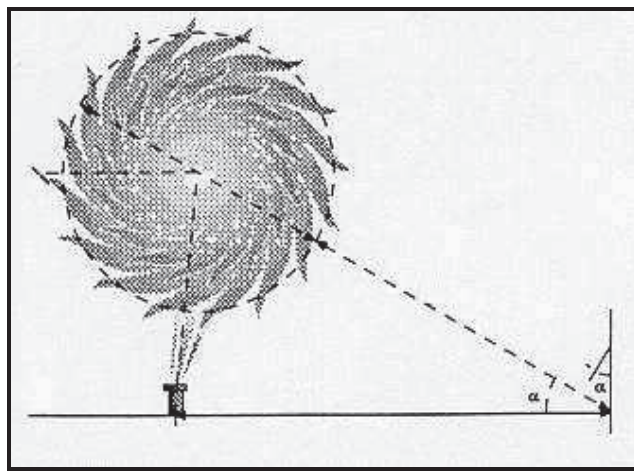
A título orientativo, se indica en la Tabla 9.1 la máxima radiación tolerable de materiales, (fuente - programa Toccata - Italia).

<b>MATERIAL</b>	<b>RADIACION MAXIMA TOLERABLE [W/m<sup>2</sup>]</b>
Cemento	60.000
Hormigón Armado	200.000
Acero	40.000
Madera	10.000
Vidrio	30.000 – 300.000
Pared de ladrillo	400.000

Tabla 9.1. Radiación máxima tolerable por algunos materiales.

### 9.5 Nivel y distancia de seguridad

Basándose en datos experimentales de incendios en los que se han visto implicadas bolas de fuego, se ha establecido un *Modelo de Energía Crítica* el cual califica la gravedad de los incendios dependiendo de la cantidad de energía que es absorbida por la piel, de una persona expuesta, después de que la temperatura de la superficie supere los 55 °C (véase en la Figura 9.3 el recorrido que sigue la radiación térmica). En base a dicho criterio, se han establecido tres niveles térmicos de radiación, que han servido de guía para establecer las distancias de seguridad usadas por los equipos de intervención de emergencias ante una posible bola de fuego:



**Figura 9.3** Recorrido de la radiación de una bola de fuego.

El nivel de seguridad puede estimarse mediante la siguiente ecuación:

$$N_s = Q_{inc} \cdot T_f \quad [9.15]$$

donde:  $N_s$ : nivel de seguridad ( $Ws/m^2$ )  
 $Q_{inc}$ : flujo de radiación incidente ( $W/m^2$ )  
 $T_f$ : duración de la bola de fuego (s)

Los niveles de seguridad son los siguientes:

- Primer nivel: flujo de  $40 \text{ kJ/m}^2$  el cual podría causar dolores y hasta quemaduras de segundo grado.
- Segundo nivel: flujo cuya exposición equivale a  $80 \text{ kJ/m}^2$  el cual causa quemaduras de segundo grado, y puede causar lesiones permanentes.
- Tercer nivel: flujo caliente que supone una exposición superior a los  $160 \text{ kJ/m}^2$  el cual causa quemaduras de tercer grado y daños permanentes.

Mudan & Desgroseilliers, (1981) establecieron unas ecuaciones muy simples para su cálculo en las bolas de fuego.

Para un **nivel de "alto riesgo"** (quemaduras de tercer grado y daños permanentes), la distancia mínima de seguridad vendrá dada por:

$$D_s = 1,48 m_{lb}^{0,56} \quad \text{para } m_{lb} > 2000 \text{ libras} \quad [9.16]$$

$$D_s = 8,0 m_{lb}^{0,33} \quad \text{para } m_{lb} < 2000 \text{ libras} \quad [9.17]$$



donde:  $D_s$ : distancia de seguridad (pies)  
 $m_{lb}$ : masa involucrada en la explosión (libras)

Para un **nivel de "bajo riesgo"** (daños leves), la distancia mínima de seguridad vendrá dada por:

$$D_s = 4,53 m_{lb}^{0,52} \quad \text{para } m_{lb} > 2000 \text{ libras} \quad [9.18]$$

para masas inferiores a las 2000 libras, la zona de seguridad queda reducida a las inmediaciones de la bola de fuego.

Otro sistema que permite evaluar distancias de seguridad es el propuesto por la institución holandesa TNO (Organización holandesa para la investigación científica) presenta las ecuaciones «Probit» siguientes:

- quemaduras mortales (protegidos con ropas):

$$P_r = -37,23 + 2,56 \ln \left( t I^{\frac{4}{3}} \right) \quad [9.19]$$

- quemaduras mortales (sin protección):

$$P_r = -36,38 + 2,56 \ln \left( t I^{\frac{4}{3}} \right) \quad [9.20]$$

otra propuesta "Probit" por Eisenberg y colaboradores evalúa el porcentaje de mortalidad por irradiación térmica para incendios tipo fogonazo de corta duración como por ejemplo las bolas de fuego ocasionadas por una BLEVE:

$$P_r = -14,9 + 2,56 \ln \left( \frac{t I^{\frac{4}{3}}}{10^4} \right) \quad [9.20 \text{ bis}]$$

- quemaduras de 2º grado:

$$P_r = -43,14 + 3,0188 \ln \left( t I^{\frac{4}{3}} \right) \quad [9.21]$$

- quemaduras de 1er. grado:

$$P_r = -39,83 + 3,0186 \ln \left( t I^{\frac{4}{3}} \right) \quad [9.22]$$

Para el caso concreto de explosiones, Eisenberg et al. Proponen las siguientes ecuaciones "Probit":

- personas afectadas por la rotura del tímpano debido a la sobrepresión originada por una explosión BLEVE

$$P_r = -15,6 + 1,96 \ln P \quad [9.23]$$

- muerte por lesiones (hemorragia) pulmonares originadas por la sobrepresión de una explosión BLEVE

$$P_r = -77,1 + 6,91 \ln P \quad [9.24]$$

- lesiones por desplazamiento y colisión del cuerpo contra un obstáculo

$$P_r = 39,1 + 4,45 \ln J \quad [9.25]$$

- lesiones por desplazamiento y colisión del cuerpo contra un obstáculo

$$P_r = -46,1 + 4,82 \ln J \quad [9.26]$$

donde:        t:        tiempo efectivo de exposición (s)  
                   I:        intensidad de irradiación (W/m<sup>2</sup>)  
                   P:        sobrepresión máxima (N/m<sup>2</sup>)  
                   J:        impulso originado por la sobrepresión durante el tiempo de actuación (Ns/m<sup>2</sup>)

En las fórmulas anteriores se ha supuesto que las lesiones ocasionadas se reducen por el factor 7 si se va protegido con ropa. En otras palabras, un porcentaje del 1% en un determinado grado de lesión en personas que utilizan ropas equivale a un 7% en personas que no van protegidas con ropas.

El valor "Probit" permite determinar el porcentaje de la población expuesta que se verá afectada a un determinado nivel de lesiones o por muerte a causa de una carga de exposición determinada. La Tabla 9.2 muestra la relación entre el valor "Probit" y el porcentaje de población expuesto a un nivel determinado de lesiones.

Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%
0	0	3,72	10	4,16	20	4,48	30	4,75	40	5,00	50	5,25	60	5,52	70	5,84	80	6,28	90	7,33	99,0
2,67	1	3,77	11	4,19	21	4,50	31	4,77	41	5,03	51	5,28	61	5,55	71	5,88	81	6,34	91	7,37	99,1
2,95	2	3,82	12	4,23	22	4,53	32	4,80	42	5,05	52	5,31	62	5,58	72	5,92	82	6,41	92	7,41	99,2
3,12	3	3,87	13	4,26	23	4,56	33	4,82	43	5,08	53	5,33	63	5,61	73	5,96	83	6,48	93	7,46	99,3
3,25	4	3,92	14	4,29	24	4,59	34	4,85	44	5,10	54	5,36	64	5,64	74	5,99	84	6,55	94	7,51	99,4
3,36	5	3,96	15	4,33	25	4,61	35	4,87	45	5,13	55	5,39	65	5,67	75	6,04	85	6,64	95	7,58	99,5
3,45	6	4,01	16	4,36	26	4,64	36	4,90	46	5,15	56	5,41	66	5,71	76	6,08	86	6,75	96	7,65	99,6
3,52	7	4,05	17	4,39	27	4,67	37	4,92	47	5,18	57	5,44	67	5,74	77	6,13	87	6,88	97	7,75	99,7
3,59	8	4,08	18	4,42	28	4,69	38	4,95	48	5,20	58	5,47	68	5,77	78	6,18	88	7,05	98	7,88	99,8
3,66	9	4,12	19	4,45	29	4,72	39	4,97	49	5,23	59	5,50	69	5,81	79	6,23	89	7,33	99	8,09	99,9

**Tabla 9.2.** Tabla "Probit" que relaciona el número Pr con el porcentaje de población expuesta a un determinado nivel de lesiones (Ref<sup>a</sup>. NTP-291 Modelos de vulnerabilidad de las personas por accidentes mayores: método Probit).



## 9.6 Cálculos experimentales

### Supuesto 1 – Límites de seguridad del butano ante la posibilidad de una BLEVE

Ante el riesgo de una BLEVE, calcular los límites de seguridad (temperatura y presión) de sobrecalentamiento para un tanque esférico que contiene 200 m<sup>3</sup> de butano.

Butano       $T_C$ :    152,8 °C (= 452,8 K)  
                  $P_C$ :    38,7 atm

En la bibliografía se pueden localizar puntos de la curva de saturación de diferentes sustancias químicas. Para el butano se tiene:  $T = -0,5$  °C y  $P = 1$  atm.

Aplicando la ecuación de la curva de saturación a los dos puntos [9.2] se obtendrán los valores de las constantes A y B:

$$\ln 38,7 = -\frac{A}{452,8} + B$$

$$\ln 1 = -\frac{A}{272,5} + B$$

resolviendo el sistema de ecuaciones se obtiene:  $A = 2769$  y  $B = 10,16$

A partir de ellas, mediante [9.3] se puede calcular la recta tangente a la curva de presión de vapor en el punto crítico, denominada *línea límite de sobrecalentamiento*. El corte de dicha recta con el eje de abscisas (X) da la temperatura a partir de la cual se empiezan a dar las condiciones de sobrecalentamiento a presión atmosférica (véanse los gráficos 9.2, 9.5 y 9.6).

$$\frac{dP_C}{dT_C} = \text{tag } \alpha = P_C \frac{A}{T_C^2} = 38,7 \frac{2769}{425,8^2} = 0,591$$

La ecuación de la recta será:  $P = T \cdot \text{tag } \alpha + \text{cte}$

donde el valor de la constante se determina conociendo un punto que esté sobre la recta (por ejemplo el punto crítico:  $T_C$ ,  $P_C$ ). Se obtiene  $\text{cte} = -213$

Así pues, en el corte con el eje de abscisas ( $P = 0$ ), la temperatura valdrá:

$$0 = T \cdot 0,591 - 213 \quad \therefore \quad T = 360,4 \text{ K}$$

Por consiguiente, los límites de riesgo para una BLEVE estarán comprendidos entre 360,4 y 452 K de temperatura.

Conocida la ecuación de la curva de saturación del butano [9.2], y las temperaturas que marcan los límites de riesgo, se pueden determinar también a qué presiones de vapor corresponden (una de ellas es la presión crítica  $P_C$ ).

$$\ln P = -\frac{2769}{361} + 10,16 = 2,49 \quad \therefore \quad P = 12,06 \text{ atm}$$

## Supuesto 2 – Límites de seguridad del butano ante la posibilidad de una BLEVE

Calcular las consecuencias que provocaría a 150 metros de distancia la radiación térmica de la BLEVE del tanque de butano descrito en el supuesto 1, si estaba almacenado a 20 °C y la humedad relativa del aire era del 50 %.

La cantidad de butano que contenía es de 200 m<sup>3</sup>

En estas condiciones, se tiene (consulta en tablas y bibliografía):

Presión absoluta del vapor de agua saturado a 20 °C: 2310 Pa

Calor de combustión del butano: 45800 kJ/kg

Densidad del butano en estas condiciones: 0,5 kg/dm<sup>3</sup> = 500 kg/m<sup>3</sup>

T<sub>C</sub>: 152,8 °C (= 452,8 K)

P<sub>C</sub>: 38,7 atm

Conocida la densidad, la masa que contenía es:  $m_{kg} = 500 \cdot 200 = 100000$  kg butano

El radio máximo de la bola de fuego [9.6 bis] será de:

$$R_f = 3,24 \cdot 100000^{0,325} = 136,6 \text{ m}$$

La altura máxima [9.7 bis] de la bola de fuego será de:

$$Z_f = 0,75 \cdot 2 \cdot 136,5 = 204,9 \text{ m}$$

y su duración [9.8 bis]:

$$T_f = 0,852 \cdot 100000^{0,26} = 16,9 \text{ s}$$

La radiación térmica recibida en un punto a 150 metros, se obtiene mediante una ecuación genérica, definida ya en el capítulo anterior [8.4], y también en este [9.11].

$$Q_{\text{rec}} = d E F$$

siendo:

- q: irradiación recibida a una distancia determinada ( $\text{kW/m}^2$ ).
- d: coeficiente de transmisión atmosférica.
- F: factor geométrico de visión, de vista o de forma.
- E: intensidad media de radiación de la llama ( $\text{kW/m}^2$ ).

El coeficiente de transmisión atmosférica es función de la humedad relativa del aire y de la distancia del punto a la bola.

Dado que:

$$\frac{P'_v}{P_v} = -0,5 \quad \therefore \quad P'_v = 0,5 \cdot 2310 = 1155 \text{ Pa}$$

la distancia a la bola de fuego se obtiene aplicando el Teorema de Pitágoras (ver Figura 9.3):

$$150^2 + 204,7^2 = X^2 \quad \therefore \quad X = 286,2 \quad \therefore \quad x = 286,2 - \text{radio} = 149,7 \text{ m}$$

coeficiente de transmisión atmosférica:  $d = 2,02 (1155 \cdot 149,7)^{-0,09} = 0,68 \text{ m}$

El factor geométrico de visión es función del diámetro de la bola de fuego y de la distancia de esta al punto donde se estudia su incidencia [9.12]:

$$F = \frac{273^2}{4 \cdot (136,5 + 149,7)^2} = 0,23$$



La intensidad media de radiación  $E$  se obtiene aplicando la ecuación [9.13], y considerando que  $f_r = 0,25$

$$E = \frac{0,25 \cdot 100000 \cdot 45800}{\pi \cdot 273^2 \cdot 17} = 288 \text{ kW/m}^2$$

La irradiación recibida será pues:  $Q_{\text{rec}} = 0,68 \cdot 0,23 \cdot 288 = 45 \text{ kW/m}^2$

Este dato no es del todo exacto en cuanto que las ecuaciones utilizadas suponen que la radiación recibida a los 150 m es de forma perpendicular. En realidad, la irradiación es recibida de forma oblicua, con un ángulo  $\alpha$ .

$$\text{tag } \alpha = \frac{204,7}{150} = 1,36 \quad \therefore \quad \alpha = 53,7^\circ$$

La irradiación recibida real será:  $Q_{\text{real}} = 45 \cos 53,7 = 26,95 \text{ kW/m}^2$

y la dosis, según [9.14]:  $\text{Dosis} = 17 \cdot 26600^{\frac{4}{3}} = 13498673,8 \text{ W/m}^2$

El estudio de los daños recibidos por la población a esta distancia viene determinado por las ecuaciones "Probit" descritas en la norma NTP-293:

### Quemaduras de primer grado

Según la ecuación [9.22], el valor del factor "Probit" para quemaduras de primer grado es el siguiente:

$$\text{Pr} = -39,83 + 3,0186 \ln \left( 17 \cdot 26950^{\frac{4}{3}} \right) = 9,76$$

La totalidad de las personas sufre quemaduras de primer grado

### **Quemaduras de segundo grado**

Según la ecuación [9.21], el valor del factor "Probit" para quemaduras de segundo grado es el siguiente:

$$Pr = -43,14 + 3,0188 \ln \left( 17 \cdot 26950^{\frac{4}{3}} \right) = 6,46$$

El 93 % de la población expuesta sufre quemaduras de segundo grado

### **Quemaduras mortales sin protección**

Según la ecuación [9.19], el valor del factor "Probit" para quemaduras mortales sin protección es el siguiente:

$$Pr = -36,38 + 2,56 \ln \left( 17 \cdot 26950^{\frac{4}{3}} \right) = 5,68 \rightarrow \text{La mortalidad será del 76 \%}$$

### **Quemaduras mortales con ropa**

Según la ecuación [9.19], el valor del factor "Probit" para quemaduras mortales con protección (ropa) es el siguiente:

$$Pr = -37,23 + 2,56 \ln \left( 17 \cdot 26950^{\frac{4}{3}} \right) = 4,82 \rightarrow \text{La mortalidad será del 44 \%}$$

La radiación de  $26950 \text{ W/m}^2$  sólo afectará destructivamente a la madera (ver Tabla 9.1).

El uso del programa informático APPO para este mismo supuesto, aporta las siguientes ventajas:

- Da la información global de todo el proceso: evaporación "flash", influencia de la temperatura y tipo de suelo, radiación solar y velocidad del viento.
- Mayor rapidez de cálculo.
- Más seguridad en las operaciones matemáticas (no equivocaciones).
- Aporta las constantes físico-químicas de la materia peligrosa implicada en el accidente que son necesarias para realizar los cálculos.
- Los resultados junto con los "datos de inicio" aparecen todos en una misma pantalla: toda la información en un único campo visual.
- Permite enlazar los resultados a posibles nuevas situaciones: área del derrame, incendio, explosión, etc.

El Esquema 9.1 muestra la pantalla de entrada y salida de datos del modelo APPO para una BLEVE de un tanque que contiene  $200 \text{ m}^3$  de butano

SAPPO

Archivo Consultas Emergencias NTP Recursos ?

**BUTANO** **Nº ONU: 1011** **FICHA DE SEGURIDAD**

Derrame de líquidos

Derrame de un gas

Area de un derrame

Evaporación de derrames

Combustión de derrames

Jet-flame

BLEVE

Explosiones

SALIR

**Derrame**

masa 100000 [kg]

volumen [litros]

Humedad Relativa aire [%] 50

EFICIENCIA 2,57

Radio maximo 136,6 [m]

Altura maxima (centro bola) 204,9 [m]

Duracion estimada 16,9 [segundos]

Potencia de radiacion emitida 67751479 [kW]

Intensidad media radiacion 288 [kW/m2]

CALCULAR QTRO CALCULO INFORME

**Vulnerabilidad [PROBIT]**

Radio zona de intervencion 584 [m] valor "Probit" ?

Radio zona de alerta 877 [m] 4,82991014857 44 % de población con ropa afectada por quemaduras mortales

5,67991014857 76 % de población sin protección afectada por quemaduras mortales

Distancia - [m] 150 6,45783467051 93 % de población afectada por quemaduras de 2º grado

Radiacion recibida 26,9511053231 [kW/m2] 9,76454874003 99,9 % de población afectada por quemaduras de 1er. grado

Esquema 9.1. Pantalla de entrada y salida de datos del modelo APPO para una BLEVE de un tanque que contiene 200 m<sup>3</sup> de butano

**Chorros de fuego.  
Jet flame.**

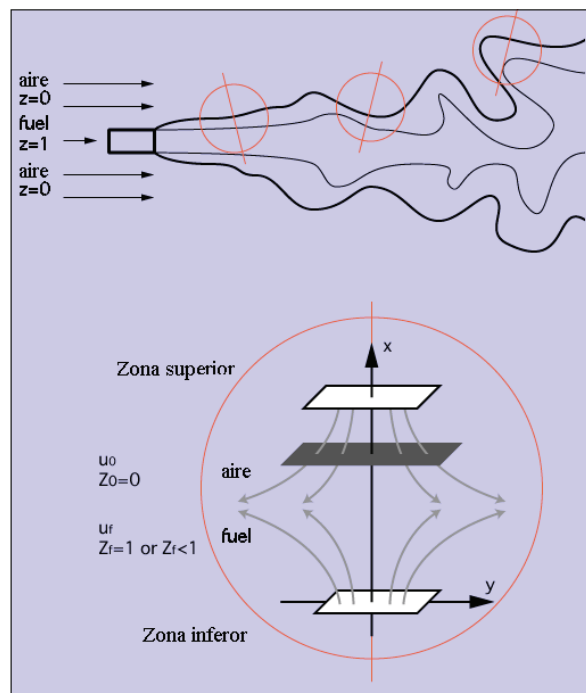
CAPÍTULO

**10**



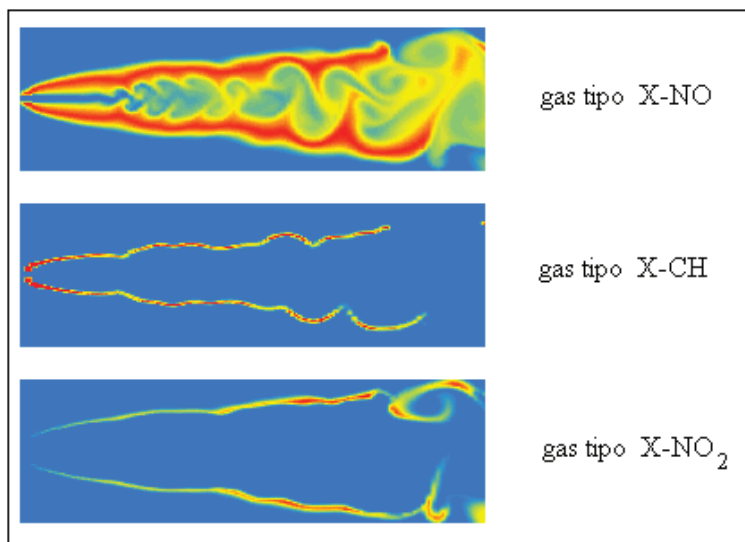
### 10.1 Introducción

Cuando un accidente provoca la rotura de un recipiente (bombona, cisterna, tanque de almacenamiento, conducción, etc.) que contiene gases licuados o gases a presión, estos son liberados al exterior a gran velocidad en forma de chorro (jet) penetrando en la atmósfera a modo de soplido mezclándose con el aire de la misma (Figura 10.1).



**Figura 10.1.** Mezcla de un chorro de gas inflamable (fuel) con el aire de la atmósfera.

Si el gas desprendido es inflamable y encuentra una fuente de ignición, entonces se crea una llama en forma de chorro (flame jet) de considerables dimensiones en lo que a longitud se refiere (depende en gran medida de la composición química del gas (Figura 10.2), y que en compañía de su correspondiente desprendimiento de calor (radiación), supone un serio peligro para las personas y bienes de las inmediaciones, especialmente cuando el accidente se produce en plantas petroquímicas, accidentes de vagones-cisterna de ferrocarril, etc. donde la llama generada puede incidir directamente en otros depósitos que contengan también materias peligrosas.



**Figura 10.2.** Diferentes formas que adopta la llama de un gas inflamable dependiendo de su composición química, en las siguientes condiciones:  $u_0 = 30$  m/s,  $T = 300$  K



## 10.2 Longitud de la llama en forma de chorro. Algoritmos

El estudio de la longitud de las llamas en forma de chorro ( $L_{\text{jet}}$ ) fue realizado por Brzustowski (1973), quien obtuvo una correlación que fue contrastada con datos experimentales, y que viene dada por cualquiera de las dos ecuaciones siguientes [10.1] o [10.2], en las que se destaca que la longitud de la llama ( $L_{\text{jet}}$ ) es proporcional al diámetro del chorro y al peso molecular del fluido respecto al aire:

$$\frac{L_{\text{jet}}}{D_{\text{jet}}} = \frac{1050}{C_{\text{lim}}} \sqrt{\frac{(\text{PM})_{\text{a}}}{(\text{PM})_{\text{fl}}}} \quad [10.1]$$

$$\frac{L_{\text{jet}}}{D_{\text{jet}}} = \frac{Y_{\text{fl}}}{0,32} \sqrt{\frac{\rho_{\text{fl}}}{\rho_{\text{a}}} \left[ 1 + \frac{(\text{PM})_{\text{a}}}{(\text{PM})_{\text{fl}}} \left( \frac{1}{0,297 C_{\text{lim}}} - 1 \right) \right]} \quad [10.2]$$

$$\frac{L_{\text{jet}}}{D_{\text{jet}}} = \frac{Y_{\text{fl}}}{0,32} \sqrt{\frac{(\text{PM})_{\text{fl}}}{29} \left[ 1 + \frac{29}{(\text{PM})_{\text{fl}}} \left( \frac{1}{0,297 \cdot LII_{\text{fl}}} - 1 \right) \right]} \quad [10.2\text{bis}]$$

donde:

- $L_{jet}$ : longitud de la llama (m)
- $D_{jet}$ : diámetro del chorro de la llama (m)
- $C_{lim}$ : concentración límite mínima (% vol)
- $(PM)_a$ : masa molecular del aire ( $\approx 29$ )
- $(PM)_{fi}$ : masa molecular del gas inflamable
- $\rho_a$ : densidad del aire ( $\text{kg/m}^3$ )
- $\rho_{fi}$ : densidad del gas inflamable ( $\text{kg/m}^3$ )
- $Y_{fi}$ : fracción másica del fluido en el aire
- $LII_{fi}$ : límite inferior de inflamabilidad del fluido

Estas ecuaciones se desarrollaron a partir de las siguientes suposiciones, según el modelo de Brzustowski:

- Para flujo turbulento, la cantidad de movimiento domina al chorro de la llama, y la velocidad de la misma es independiente de la velocidad másica de flujo.
- Para estimar la longitud de la llama, visible y no visible, se aplica un criterio de concentración. Esencialmente el final de una llama con difusión turbulenta ocurre en un punto sobre su eje longitudinal, donde la concentración del fluido es igual a una concentración límite ( $C_{lim}$ ) que coincide con el Límite Inferior de Inflamabilidad (dato validado por datos experimentales).
- No se incluye el efecto que pueda tener el viento lateral sobre la longitud de la llama.
- Para chorros turbulentos expandidos, la longitud de la llama se correlaciona con el llamado *pseudo-diámetro* del chorro.
- El modelo no distingue entre chorros de llamas verticales, horizontales o inclinadas.

- Los riesgos son evaluados en el mismo plano del chorro. Para el caso de chorros de llamas en elevación, deberá considerarse también la altura y la orientación.

Otros autores como Crocker y Naiper (1988) propusieron también una fórmula más compleja de dos sumandos, basada en determinar primeramente el calor (Q) desprendido por la combustión del fluido, tal como establecen Fausque y Epstein (1987), en el primer sumando, y el conocimiento de la distancia (a) existente entre el orificio de salida del gas y la base de la llama, en el segundo sumando.

$$L_{\text{jet}} = 1,32 \cdot 10^{-3} \left( \frac{\Delta H_v A}{v_{\text{lg}} \sqrt{T C_{\text{pl}}}} \right)^{0,52} - 1,6 \pi D_{\text{jet}} \frac{U_{\text{jet}}}{U_a} \quad [10.3]$$

- donde: Q: calor desprendido por combustión del fluido (kW)  
 $D_{\text{jet}}$ : diámetro del chorro (m)  
 $U_{\text{jet}}$ : velocidad de salida del chorro (Mach)  
 $U_a$ : velocidad del chorro a una distancia "a" ( $\approx 0,2$  Mach)  
 $\Delta H_v$ : calor latente de vaporización en el punto de ebullición (J/kg)  
A: área del fluido derramado (m<sup>2</sup>)  
 $v_{\text{lg}}$ : volumen específico (=  $1/\rho_{\text{vap}} + 1/\rho_{\text{liq}}$ ) (m<sup>3</sup>/kg)  
T: temperatura del fluido (K)  
 $C_{\text{pl}}$ : capacidad calorífica del líquido a presión cte. y temperatura T (J/kg·K)

en el caso de que  $U_{\text{jet}} < U_a$  entonces el segundo término de la ecuación [10.3] se considera nulo.



### 10.3 Ecuaciones de conservación

Ciertas ecuaciones (conservación de la materia y conservación de cantidad de movimiento) usadas por el paquete informático CHEMS permiten estimar el diámetro de expansión que experimenta el gas al salir por una boquilla, suponiendo que no entra aire durante la despresurización.

#### Balance de cantidad de movimiento en dirección axial

Permite calcular la velocidad de expansión:

$$(P_0 - P_{\text{atm}}) A_0 = (u_e - u_0) \rho_0 u_0 A_0 \quad \therefore \quad u_e = u_0 + \frac{P_0 - P_{\text{atm}}}{\rho_0 u_0} \quad [10.4]$$

donde:

- $u_e$ : velocidad de expansión (m/s)
- $u_0$ : velocidad de salida de la boquilla (m/s), calculada mediante [5.4]
- $P_0$ : presión en el interior del tanque (Pa)
- $P_{\text{atm}}$ : presión atmosférica (Pa)
- $\rho_0$ : densidad del gas en el interior del tanque ( $\text{kg/m}^3$ )
- $A_0$ : área del orificio ( $\text{m}^2$ )

### Balance de materia

Permite calcular el diámetro de expansión del chorro de gas expansionado

$$D_e = D_0 \sqrt{\frac{\rho_0 u_0}{\rho_e u_e}} \quad [10.5]$$

donde:  $D_e$ : diámetro de expansión (m)  
 $D_0$ : diámetro del orificio (m)

### Balance de energía

Permite calcular la temperatura del gas a la salida

$$T_e = T_0 - \frac{u_e^2 - u_0^2}{2 C_p} \quad [10.6]$$

La densidad del gas expansionado se puede calcular con la ecuación de los gases perfectos

$$\rho_e = \frac{P_e \text{ (PM)}}{R T_e} = \frac{P_{\text{atm}} \text{ (PM)}}{R T_e} \quad [10.7]$$

y el riesgo por radiación térmica de una llama en forma de chorro se estima por la caracterización de la longitud de la llama; la zona de riesgo representa dos veces la dimensión longitudinal.

### 10.4 Radiación de la llama, según CHARM

El riesgo por radiación térmica provocado por el chorro de una llama, se puede estimar por la caracterización de la longitud de la llama como una función del tipo de fluido y la suposición, de que la zona considerada de riesgo equivale a dos veces la dimensión longitudinal del chorro. Por otro lado, siempre se considerará que el riesgo de la radiación sobre personas es más grande que el riesgo potencial a equipos que hay en la dirección del chorro de la llama.

Para cuantificar su valor, Crocker y Naiper (1988) utilizaron del valor de ( $L_{jet}$ ), considerando que la llama se encuentra en el origen de un hipotético eje de coordenadas y que el chorro de la llama se encuentra sobre el eje X. Las ecuaciones propuestas son las siguientes:

#### Radiación liberada en el plano horizontal $q_H$

El valor de la radiación liberada en el plano horizontal puede estimarse mediante la siguiente ecuación:

$$q_H = \frac{2,2 \cdot 10^{-4} \sqrt{\Delta H_C (PM)} Q \sqrt{1 + m^2}}{2 \pi L (b^2 - 4 d c)} \left( \frac{B x_L + C}{P_L} - \frac{C}{P_0} \right) \quad [10.8]$$

- donde:  $\Delta H_c$ : calor de combustión (J/g)  
 (PM): peso molecular del fluido  
 Q: calos desprendido por combustión del fluido (kW)  
 m: inclinación de la llama  
 b:  $-2(x - m z)$   
 c:  $x^2 + y^2 + z^2$   
 d:  $1 + m^2$   
 B:  $m b + 2dz$   
 C:  $2 m c + b z$   
 P<sub>L</sub>:  $(d x_L^2 + b x_L + c)^{1/2}$   
 P<sub>0</sub>:  $c^{1/2}$   
 X<sub>L</sub>:  $L \cos(\cdot/2 - \theta)$  (m)  
 $\theta$ : inclinación de la llama respecto a la vertical (rad)  
 x, y, z: localización del centro del plano (m)

### Radiación liberada en el plano vertical y perpendicular al eje X, $q_{v+}$

La radiación liberada en el plano vertical y perpendicular al eje x puede obtenerse mediante la siguiente ecuación:

$$q_{v+} = \frac{2,2 \cdot 10^{-4} \sqrt{\Delta H_c (PM)} Q \sqrt{1 + m^2}}{2 \pi L (4 d c - b^2)} \left( \frac{D x_L + E}{P_L} - \frac{E}{P_0} \right) \quad [10.9]$$

- donde D:  $2 x d + d$   
 E:  $x b + 2 c$



**Radiación liberada en el plano vertical y paralela al eje X,  $q_{v=}$** 

La radiación liberada en el plano vertical y paralela al eje x puede obtenerse mediante la siguiente ecuación:

$$q_{v=} = \frac{2,2 \cdot 10^{-4} \sqrt{\Delta H_c} (PM) Q \sqrt{1+m^2}}{2 \pi L (4 d c - b^2)} \left( \frac{2 d x_L + b}{P_L} - \frac{b}{P_0} \right) \quad [10.10]$$

**Radiación total liberada  $q$** 

La radiación total liberada puede obtenerse mediante la siguiente ecuación:

$$q = \sqrt{q_H^2 + q_{V+}^2 + q_{V=}^2} \quad [10.11]$$



## 10.5 Cálculos experimentales

### Supuesto 1 – depósito de propano gas.

Calcular la longitud que tendrá el chorro de una llama de gas propano, el cual se derrama a través de un orificio de 1 cm de diámetro de un depósito que está a 5 atmósferas de presión y una temperatura ambiente de 25 °C

Una búsqueda bibliográfica y del enunciado proporciona los siguientes datos:

Producto:	propano
$P_0$ :	5 atm = $5,07 \cdot 10^5$ Pa
$T_0$ :	25 °C = 298 K
$D_0$ :	1 cm = 0,01 m
$\gamma$ :	1,127
LII:	2,1 % vol

El primer paso consiste en determinar el volumen másico de propano contenido en el tanque. Dicho valor se calcula a partir de la ecuación de los gases ideales:

$$v = \frac{R T_0}{P_0 \text{ (PM)}} = \frac{8310 \cdot 298}{5,07 \cdot 10^5 \cdot 44} = 0,111 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

la densidad del propano en el interior del depósito, y también justo al momento de salir se calcula mediante [10.7]

$$\rho_0 = \frac{P_0 \text{ (PM)}}{R T_0} = \frac{5,07 \cdot 10^5 \cdot 44}{8310 \cdot 298} = 9,01 \text{ kg/m}^3$$

la velocidad de salida del gas ( $u_0$  en m/s), origen de la llama en forma de chorro viene dada por la siguiente ecuación [5.4]

$$u_0 = \sqrt{\frac{2 \gamma v P_0}{\gamma - 1} \left[ 1 - \left( \frac{P_{\text{atm}}}{P_0} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right]} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,127 \cdot 0,111 \cdot 5,07 \cdot 10^5}{1,127 - 1} \left[ 1 - \left( \frac{1 \cdot 10^5}{5,07 \cdot 10^5} \right)^{\frac{1,127 - 1}{1,127}} \right]} = 408,64$$

y la velocidad de expansión  $u_e$  [10.4]

$$u_e = u_0 + \frac{P_0 - P_{\text{atm}}}{\rho_0 u_0} = \frac{5,07 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^5}{9,01 \cdot 408,64} = 5,19 \cdot 10^2 \text{ m/s}$$

Aplicando la ecuación de los gases ideales se obtiene la densidad del gas expansionado:

$$\rho_e = \frac{P_{atm} (PM)}{R T_{amb}} = \frac{1 \cdot 10^5 \cdot 44}{8310 \cdot 298} = 1,777 \text{ kg/m}^3$$

la cual es un parámetro necesario para calcular el diámetro de expansión  $D_e$  mediante [10.5]

$$D_e = D_0 \sqrt{\frac{\rho_0 u_0}{\rho_e u_e}} = 0,01 \sqrt{\frac{9,01 \cdot 408,64}{1,777 \cdot 5,19 \cdot 10^2}} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

y la longitud de la llama en forma de chorro según lo establecido en [10.1] al principio del derrame será:

$$L_{jet} = D_e \frac{1050}{C_{lim}} \sqrt{\frac{(PM)_{aire}}{(PM)}} = 2 \cdot 10^{-2} \frac{1050}{2,1} \sqrt{\frac{29}{44}} = 8,11 \text{ m}$$

$$\text{Zona de riesgo} = 2 \cdot L_{jet} = 16,22 \text{ m}$$

La Tabla 10.1 muestra los parámetros del chorro para diferentes valores de presión interna.

Presión interior [Pa]	Velocidad salida [m/s]	Velocidad expansión [m/s]	Diámetro expansión [m]	Longitud expansión [m]
$5 \cdot 10^5$	408,64	$5,19 \cdot 10^2$	$2,00 \cdot 10^{-2}$	8,11
$4 \cdot 10^5$	380,09	$4,91 \cdot 10^2$	$1,76 \cdot 10^{-2}$	7,14
$3 \cdot 10^5$	341,05	$4,51 \cdot 10^2$	$1,51 \cdot 10^{-2}$	6,11
$2 \cdot 10^5$	273,96	$3,77 \cdot 10^2$	$1,21 \cdot 10^{-2}$	4,90
$1 \cdot 10^5$	0	0	0	0

**Tabla 10.1.** Parámetros del chorro para diferentes valores de presión interna

## Supuesto 2 – botella de etileno.

Tomando como referencia el mismo supuesto propuesto en el tema 5: *Determinar los valores del caudal másico, la presión y temperatura en función del tiempo en una emisión de gas etileno a través de un orificio de 0,1 cm de diámetro ( $C_d = 0,85$ ) que se encuentra almacenado en una bombona a la temperatura ambiente de 25 °C (298 K). La capacidad de la bombona es de 50 litros, y en su interior el etileno se encuentra a una presión de 30 bar.*

Los datos correspondientes al etileno gas son los siguientes:

Temperatura ebullición:	-104 °C = 169 K
Temperatura crítica:	9,7 °C = 282,7 K
Presión crítica:	50,5 atm = 5,12 MPa
Peso molecular:	28
$\gamma$ :	1,18

En este supuesto, el uso del programa informático APPO aporta las siguientes ventajas:

- No hay que recurrir a hojas de cálculo para determinar la evolución de los diferentes parámetros de la bombona en función del tiempo.
- Da la información global de todo el proceso: evaporación "flash", influencia de la temperatura y tipo de suelo, radiación solar y velocidad del viento.
- Mayor rapidez de cálculo.
- Más seguridad en las operaciones matemáticas (no equivocaciones).
- Aporta las constantes físico-químicas de la materia peligrosa implicada en el accidente que son necesarias para realizar los cálculos.
- Los resultados junto con los "datos de inicio" aparecen todos en una misma pantalla: toda la información en un único campo visual.
- Permite enlazar los resultados a posibles nuevas situaciones: área del derrame, incendio, explosión, etc.

El Esquema 10.1 muestra la pantalla de entrada y salida de datos de una simulación con el Modelo APPO.

**ETILENO** **Nº ONU: 1038** **FICHA DE SEGURIDAD**

**Datos del Depósito**

- Volumen [litros] 50
- Cuadrado
- Cilíndrico horizontal
- Cilíndrico vertical
- Esférico

Altura [metros] \_\_\_\_\_

Lado 1 [metros] \_\_\_\_\_

Lado 2 [metros] \_\_\_\_\_

Radio [metros] \_\_\_\_\_

Temperatura 25 [°C]

Presion 30 [atm]

Diámetro orificio 0,1 [cm]

Cd 0,85

Tiempo [s]	Tipo de flujo	Diam efectivo [m]	Velocidad exp [m/s]	Diametro exp [m]	Longitud llama [m]	Zona Lift-off [m]	Potencia radiación [J/s]
1570	Subsonico	0,000214	357,674652	0,000568	0,1956	0,039	0,017806
1580	Subsonico	0,000214	357,674652	0,000507	0,1746	0,0348	0,017567
1590	Subsonico	0,000214	357,674652	0,000444	0,1529	0,0305	0,017328
1600	Subsonico	0,000214	357,674652	0,000382	0,1315	0,0262	0,017089
1610	Subsonico	0,000214	357,674652	0,000319	0,1098	0,0219	0,01685
1620	Subsonico	0,000214	357,674652	0,000258	0,0888	0,0177	0,016625
1630	Subsonico	0,000214	357,674652	0,000197	0,0678	0,0135	0,016401
1640	Subsonico	0,000214	357,674652	0,000138	0,0475	0,0094	0,016176
1650	Subsonico	0,000214	357,674652	8E-5	0,0275	0,0054	0,015951
1660	Subsonico	0,000214	357,674652	2,5E-5	0,0086	0,0017	0,01574

Tiempo estimado de derrame 27,83 [minutos] **EXPORTAR**

Gráfica: Potencia radiación emitida [J/s] vs tiempo [segundos].

**Esquema 10.1.** Parámetros del chorro para diferentes valores de presión interna.

La gráfica mostrada en la pantalla aporta información sobre cómo evoluciona la longitud de la llama y la radiación térmica emitida con el paso del tiempo.





**Explosiones.**

CAPITULO





## 11.1 Introducción

Para la mayoría de las personas, una explosión se asocia inmediatamente a una imagen de destrucción. No obstante, la mayoría de las explosiones que ocurren a diario, son controladas, como las de los motores de los vehículos, la demolición de edificios, la extracción de metales, minerales, etc. En este capítulo se tratan únicamente las explosiones accidentales, no deseadas, las cuales pueden generar grandes pérdidas económicas y también en vidas humanas, principalmente en el ámbito de las industrias de proceso.

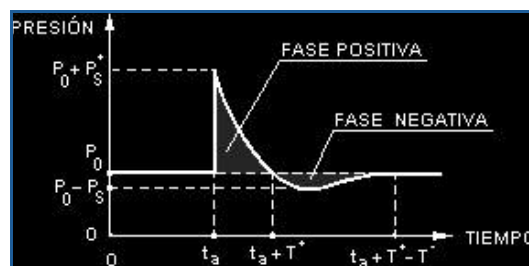
En general se puede definir una explosión como una liberación repentina de energía (almacenada inicialmente bajo una gran variedad de formas: nuclear, química, eléctrica, presión, etc.), que genera una onda de presión que se desplaza alejándose de la fuente mientras va disipando energía. Los escenarios donde suelen darse tales accidentes son:

- espacios cerrados
  - ignición de mezclas gaseosas inflamables (CVE: Confined Vapor Explosion)
  - ignición de polvo combustible en suspensión
  
- espacios abiertos
  - ignición de nubes de vapor sobrecalentado (UVCE: Unconfined Vapor Cloud Explosion)

- explosión de recipientes
  - gas comprimido
  - gas licuado o líquido sobrecalentado (BLEVE)
  - reacciones fuera de control (runaway reactions)

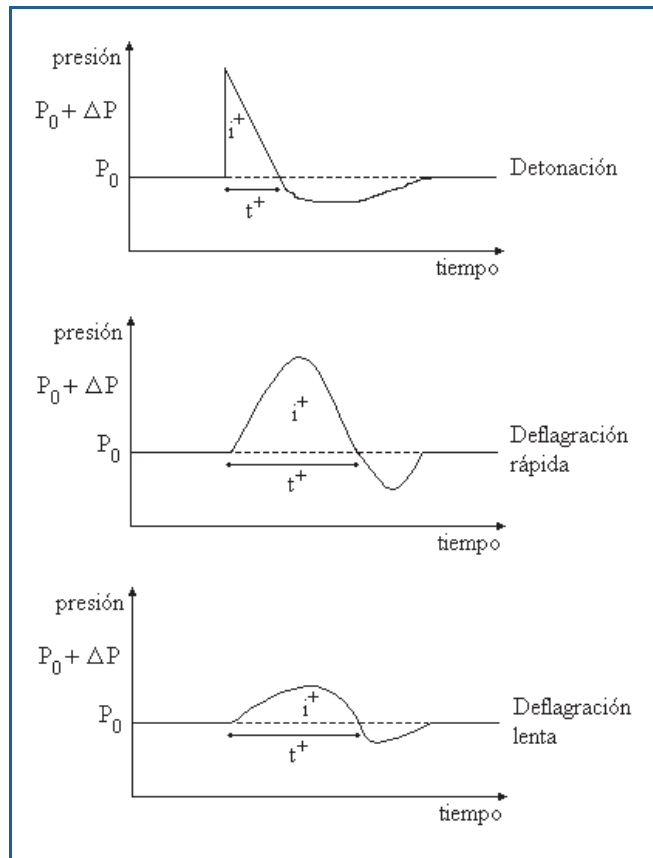
Muchas de las explosiones accidentales, aunque no todas, suelen originarse por una reacción de combustión o por reacciones exotérmicas fuera de control. La liberación repentina genera una onda de choque que se mueve lejos de la fuente que la originó a una velocidad determinada, en parte por la diferencia de presiones, y en parte por las propiedades de la sustancia a través de la cual se propaga.

Esta onda tiene unas características o parámetros que pueden ser medidos y/o correlacionados con los daños provocados. En un punto determinado, antes de la llegada del frente de choque, la presión existente es la atmosférica  $P_0$ . Cuando llega la onda de choque (tiempo  $t_a$ ), la presión sube rápidamente hasta un valor  $P_0 + P_s$  (sobrepresión incidente máxima), tal como se indica en el Esquema [11.1].



**Esquema 11.1.** Variación de la onda de presión en una explosión con el tiempo.

A partir de este momento, la presión decae hasta alcanzar la presión ambiental en un tiempo  $t_a + T^+$ , pasando seguidamente por una disminución de presión o vacío de amplitud  $P_0$  y finalmente retorna al valor ambiental  $P_0$  en un tiempo total  $t_a + T^+ + T^-$ , tal como se muestra en el Esquema [11.2].



**Esquema 11.2.** Onda de choque para diferentes tipos de explosión ( $P_0$  = presión ambiente,  $\Delta P$  = pico de sobrepresión,  $t^+$  = duración de la fase positiva,  $i^+$  = impulso positivo).





## 11.2 Factores que influyen en una explosión

La nota técnica de prevención NTP 321 del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo concluye:

- Debe existir una masa mínima de sustancia inflamable para que pueda darse una explosión de nube de vapor no confinada. Ciertas estimaciones van de 1 a 15 toneladas.
- Las sustancias que tienen velocidades de combustión grandes ocasionan más fácilmente explosiones para una misma cantidad de producto acabado.
- Las sobrepresiones máximas de estas deflagraciones son mucho menores que si fueran detonaciones. Son aproximadamente 1 bar (100 kPa) y con duraciones de la fase positiva (Esquema 11.1) de 20 a 100 ms.





### 11.3 Explosión de nubes de vapor no confinadas

El efecto que puede producir la ignición de una nube de vapor que no está confinada corresponde a un tipo de derrame poco frecuente: escape rápido de un fluido inflamable junto a una dispersión moderada para formar una nube inflamable muy grande de aire y fluido. Tal proceso corresponde a una deflagración (velocidad de propagación del frente de llama inferior a la del sonido) y en contadas ocasiones a una detonación (velocidad de propagación del frente de llama superior a la del sonido). Su mecanismo es muy complejo y todavía no se ha dilucidado en su totalidad, por lo que en la práctica, se recurre a evaluar las energías y sobrepresiones equivalentes a las explosiones de TNT (Zabetakis, 1967).

De hecho, no resulta sencillo comparar la energía de combustión por unidad de masa de la nube de vapor con la de una determinada masa de TNT, teniendo en cuenta también que sólo una fracción de energía liberada contribuirá a la explosión (factor de rendimiento  $Y_f$ ).

Para su cálculo se han considerado varias simplificaciones:

- la temperatura ambiente es de 20 °C
- la masa de explosivo es comparada a una carga equivalente de TNT
- los efectos del terreno, construcciones y obstáculos son despreciables

$$m_{\text{TNT}} = m_{\text{nube}} \frac{\Delta H_{\text{C}}}{1155} Y_{\text{f}} \quad [11.1]$$

- donde:
- $m_{\text{TNT}}$ : masa equivalente de TNT (libras)
  - $m_{\text{nube}}$ : masa de la nube de vapor (libras)
  - $\Delta H_{\text{C}}$ : calor de combustión (kcal/kg)
  - 1155: corresponde al calor de combustión-detonación
  - $Y_{\text{f}}$ : factor de rendimiento de la sustancia (3 % para hidrocarburos alifáticos, 6 % para alquenos, y 17 % para fuels que contienen  $\text{O}_2$ ); consultar las tablas de valores  $Y_{\text{f}}$  en las páginas siguientes a esta.

La Tabla 11.1 muestra las principales sustancia con factor de rendimiento  $Y_{\text{f}} = 0,03$ .

Sustancias con factor de rendimiento $Y_{\text{f}} = 0,03$		
Acetaldehído	3-metil-1-Buteno	Alcohol Isopropílico
Acetona	metil-butil-Cetona	Tolueno
Acrilonitrilo	Cloruro de metilo	Isooctano
Alcohol Amílico	metil-etil-Cetona	Tetrafloretileno
Benceno	Formiato de metilo	Isobutileno
1,3-Butadieno	Metano	Metanol
1-Buteno	metil-propil-Cetona	Alcohol Isobutílico
Cianógeno	Acetato de n-Amilo	Sulfuro de Hidrógeno
1,2-Dicloroetano	n-Butano	Hidrógeno
Eter Dimetílico	n-Acetato de Butilo	Propileno
Sulfuro de dimetilo	n-Decano	Acido Hidrociánico
Etano	n-Heptano	Propilaldehido
Etanol	n-Hexano	Acetato de metilo
Acetato de Etilo	n-Pentano	Propano
Etil Benceno	n Acetato de Propilo	Anhídrido ftálico
Cloruro de Etilo	O Diclorobenceno	Formiato de etilo

Tabla 11.1. Sustancias con factor de rendimiento  $Y_{\text{f}} = 0,03$

Las Principales sustancia con factor de rendimiento  $Y_f = 0,06$  se muestran en la Tabla 11.2.

Sustancias con Factores de Rendimiento $Y_f = 0,06$	
Acroleina	Etileno
Sulfuro de Carbono	Nitrito de Etilo
Cicloexano	metil-vinil Eter
Eter Dietílico	Anhídrido Ftálico
Eter Divinílico	Oxido de propileno

Tabla 11.2. Sustancias con factor de rendimiento  $Y_f = 0,06$

Las Principales sustancia con factor de rendimiento  $Y_f = 0,19$  se muestran en la Tabla 11.3.

Sustancias con Factores de Rendimiento $Y_f = 0,19$	
Acetileno	Nitrato de Isopropilo
Óxido de Etileno	Metil Acetileno
Nitrato de Etilo	Nitrometano
Hidracina	Acetato de vinilo

Tabla 11.3. Sustancias con factor de rendimiento  $Y_f = 0,19$

Baker y colaboradores propusieron la siguiente fórmula en unidades internacionales:

$$m_{\text{TNT}} = m_{\text{nube}} \frac{\Delta H_C}{4520} Y_f \quad [11.1 \text{ bis}]$$

donde:

- $m_{\text{TNT}}$ : masa equivalente de TNT (kg)
- $m_{\text{nube}}$ : masa de la nube de vapor liberado (kg)
- $\Delta H_C$ : calor de combustión (kJ/kg)
- $Y_f$ : factor de rendimiento-eficacia de la sustancia (normalmente entre 0,01 y 0,10): coeficiente entre la energía real liberada y la teóricamente disponible
- 4520 corresponde al calor de combustión-detonación (kJ/kg)

Normalmente se supone que toda la materia inflamable de la nube está disponible para la combustión y que la energía teóricamente disponible es por lo tanto el producto de la cantidad total de materia inflamable en la nube por el calor de combustión. En base a esto, el rendimiento de la explosión suele estar en el rango de 1 al 10 %.

Vista la equivalencia existente entre las explosiones de nubes de vapor con las de TNT, los valores de sobrepresión registrados en las explosiones de TNT, también sirven como base de datos para determinar las distancias de sobrepresión en las explosiones de nubes de vapor, y los daño que puede ocasionar (tabla 11.4). "Handbook of chemical hazard analysis procedures" propone la siguiente expresión:

$$D_{\text{SP}} = (m_{\text{TNT}})^{\frac{1}{3}} \exp[3,5031 - 0,7241 \ln S_p + 0,0398 (\ln S_p)^2] \quad [11.2]$$

donde:

- $D_{\text{SP}}$ : distancia a la que se da la sobrepresión (pies)
- $S_p$ : sobrepresión (psi)
- $m_{\text{TNT}}$ : masa equivalente de TNT (libras)

Sobrepresión (psi)	Daño esperado
0,03	Rotura ocasional de ventanales grandes
0,04	Ruidos fuertes (143 dB)
0,10	Rotura de pequeñas ventanas
0,30	Algunos daños en los techos de las casas; rotura de un 10 % de los vidrios de las ventanas
0,40	Pequeños daños en estructuras
0,50 – 1,0	Ventanas destrozadas; daños en los marcos de las ventanas
0,7	Daños menores en las estructuras de las casas
1,0	Demolición parcial de las casas haciéndolas inhabitables
1,0 – 2,0	Doblado y caída de paneles de metal ondulado
1,0 – 8,0	Daños ligeros o serios debidos a heridas en la piel causadas por trozos de cristales u otros objetos que "vuelen"
1,3	Marcos metálicos de ventanas de edificios ligeramente destruidos
2,0	Derrumbamiento parcial de paredes y tejados de las casas
2,0 – 3,0	Destrozos de las paredes de hormigón no reforzado o de bloques
2,3	Límite inferior de daños serios en estructuras
2,4 – 12,2	Rotura del tímpano a las personas expuestas entre un 1 y un 90 %
2,5	Destrucción del 50 % del enladrillado de las casas
3,0	Deformación de marcos metálicos de los edificios
3,0 – 4,0	Los edificios quedan sin marcos de puertas y ventanas
4,0	Rotura de los revestimientos de edificios ligeros
5,0	Se rompen en añicos las maderas
5,0 – 7,0	Completa destrucción de las casas
7,0	Vuelco de vagones de trenes de mercancías
7,0 – 8,0	Rotura de ladrillos no reforzados de 8 a 12 pulgadas
9,0	Destrucción de coches, trenes de mercancías, etc.
10,0	Probable destrucción total de los edificios
15,5 – 29,0	Muerte de las personas expuestas a la explosión en un rango del 1 al 99 %

Tabla 11.4. estimación de daños de explosiones de gases a sobrepresión



## 11.4 Explosión de tanques sobrepresurizados

La energía liberada que produce la ruptura violenta (sin combustión) de un depósito-contenedor depende en gran medida del volumen y de la presión interna del tanque (espacio que ocupa la fase vapor). La explosión de un depósito de gas conlleva mucho más peligro que la explosión de un depósito idéntico al anterior pero lleno de líquido, a las mismas condiciones de presión que el anterior.

El modelo que permite cuantificar tales hechos (Baker, 1973) se basa en las siguientes suposiciones:

- la geometría del depósito es esférica
- la propagación de la onda es unidireccional
- la explosión del depósito se da a nivel del suelo

y el algoritmo propuesto es el siguiente:

- calcular la relación  $P_i/P_a$  donde  $P_a$  es la presión ambiental y  $P_i$  la presión en el interior del tanque, antes de su ruptura

- calcular la relación  $T_i/T_a$  donde  $T_a$  es la temperatura ambiental y  $T_i$  la temperatura del gas o vapor en el interior del depósito, antes de su ruptura
- determinar el valor de la onda de choque o sobrepresión de inicio  $P_{S0}$  resolviendo por métodos iterativos (prueba – error) la siguiente ecuación, donde  $\gamma$  corresponde a la relación de calores específicos ( $C_p/C_v$ ):

$$f = 0 = \ln\left(\frac{P_i}{P_a}\right) - \ln(1 + P_{S0}) - \frac{2\gamma_i}{1 - \gamma_i} \ln \left[ 1 - \frac{(\gamma_i - 1) P_{S0}}{2 \sqrt{\frac{T_i}{T_a}} \sqrt{\gamma_a^2 + 0,5 \gamma_a (\gamma_a + 1) P_{S0}}} \right] \quad [11.3]$$

$$\frac{P_i}{P_a} = \frac{P_{S0}}{P_a} \left[ 1 - \frac{(\gamma_i - 1) \left(\frac{a_a}{a_i}\right) \left(\frac{P_{S0}}{P_a} - 1\right)}{\sqrt{2\gamma_a \left[ 2\gamma_a + (\gamma_a + 1) \left(\frac{P_{S0}}{P_a} - 1\right) \right]}} \right]^{\left(\frac{-2\gamma_i}{\gamma_i - 1}\right)} \quad [11.3 \text{ bis}]$$

- $P_i$ : presión en el interior del depósito  
 $P_a$ : presión ambiente  
 $P_{S0}$ : sobrepresión inicial  
 $\gamma_i$ :  $\gamma$  en el interior del depósito  
 $\gamma_a$ :  $\gamma$  en el exterior (ambiente)  
 $a_a$ : velocidad del sonido en el aire  
 $a_i$ : velocidad del sonido en el interior del depósito



- calcular el valor de la *distancia de inicio o de arranque* (llamada también radio de energía)  $R_0$  que es adimensional.

$$R_0 = \frac{1}{\left[ \frac{4\pi \left( \frac{P_i}{P_a} - 1 \right)}{3} \right]^{\frac{1}{3}} \frac{1}{\gamma_i - 1}} = \left( \frac{E}{P_a} \right)^{\frac{1}{3}} \quad [11.4]$$

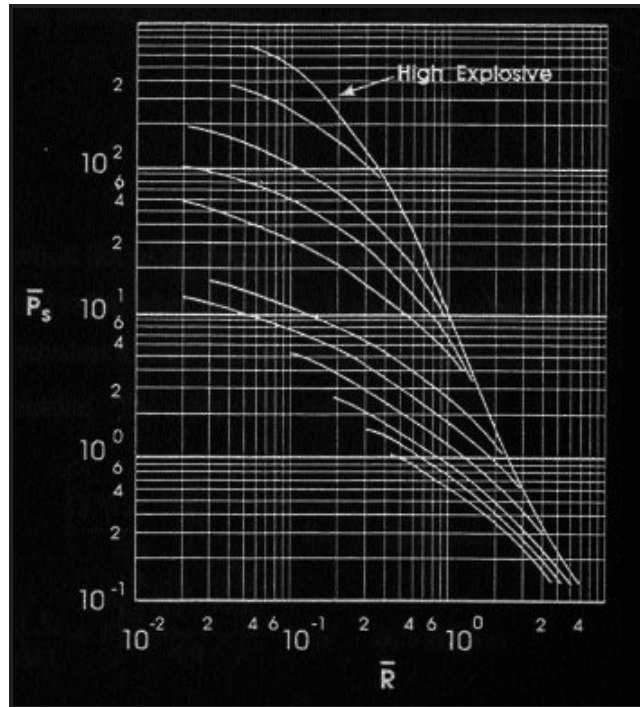
$$E = \left( \frac{P_i - P_a}{\gamma_i - 1} \right) V \quad [11.5]$$

- calcular el valor de  $R$ , donde  $V$  es el volumen del gas en el interior del tanque, y  $r$  es el radio del depósito esférico (si está al nivel del suelo, hay que doblar el valor de  $r$ )

$$R = \frac{r}{\left[ \frac{V \left( \frac{P_i}{P_a} - 1 \right)}{\gamma_i - 1} \right]^{\frac{1}{3}}} \quad [11.6]$$

- una vez conocidos los valores de  $P_{s0}$  y  $R_0$ , localizar en el gráfico 11.1 el punto asociado a tales valores (punto de inicio de la curva)
- calculado el valor de  $R$ , y sabiendo cual curva utilizar del gráfico, se puede determinar el valor buscado de sobrepresión  $P_s$  (si el recipiente está sobre el suelo y/o cerrado sobre una superficie reflejante, incrementar el valor de  $P_s$  en un 100 % si  $R$  es menor que 1, y por un 10 % si  $R$  es mayor que 1)
- la sobrepresión se determina multiplicando el resultado anterior de  $P_s$  por la presión ambiental  $P_a$

La Gráfica 11.1 muestra la forma de resolver el algoritmo de Baker.



**Gráfico 11.1.** Gráfico para la resolución del algoritmo de Baker.

Si el depósito es de geometría cilíndrica en lugar de esférica, hay que realizar los siguientes ajustes:

- Si el valor de  $R$  es inferior a 0,3 entonces hay que multiplicar por 4,5 el valor de la sobrepresión  $P_s$ .
- Si el valor de  $R$  es cercano a 1,0 entonces multiplicar  $P_s$  por 1,6
- Si el valor de  $R$  es igual o superior a 3,5 entonces multiplicar  $P_s$  por 1,4

Realmente, las diferencias entre un depósito cilíndrico y uno esférico son de tipo cualitativo. Por tal motivo las correcciones no son muy precisas, y tampoco muy complejas.

### 11.5 Zonas de alerta y de intervención [NTP 291 y NTP 321]

La directriz básica para la elaboración y homologación de los Planes Especiales del Sector Químico (B.O.E. 62-1991) establece unos valores umbral que sirven para delimitar las zonas potencialmente afectadas por un accidente mayor y para las cuales se debe tener previsto el llamado Plan de Emergencia Exterior.

**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.

**Zona de alerta:** Es aquella en la que las consecuencias de los accidentes provocan efectos que, aunque perceptibles por la población, no justifican la intervención, excepto para los grupos críticos, que serán definidos por el responsable del grupo sanitario para cada caso concreto.

Las Tablas 11.5 y 11.6 muestran los daños que en personas y estructuras puede ocasionar una sobrepresión.

DAÑOS PERSONALES	SOBREPRESIÓN	DAÑOS ESTRUCTURALES	SOBREPRESIÓN
Umbral muerte lesión pulmón	0,70 bar	Demolición total	0,80 bar
Umbral rotura tímpano	0,35 bar	Daños irrecuperables	0,40 bar
Umbral zona de intervención	0,125 bar	Daños estructuras importantes	0,18 bar
Umbral zona de alerta	0,050 bar	Daños graves reparables	0,15 bar
		Daños estructurales menores	0,047 bar
		Cristales rotos al 90 %	0,040 bar

Tabla 11.5 consecuencias que ocasionan las sobrepresiones

Tabla 11.5 consecuencias que ocasionan las sobrepresiones

Según la normativa, los valores umbrales que deberán adoptarse para la delimitación de la **Zona de Intervención** son los que a continuación se señalan:

- Un valor local integrado del impulso, debido a la onda de presión, de 150 mbar·s (15000 Pa·s).
- Una sobrepresión local estática de la onda de presión de 125 mbar (12500 Pa).
- El alcance máximo de proyectiles con un impulso superior a 10 mbar·s en una cuantía del 95%, producidos por explosión o estallido de continentes (depósitos a presión, tanques atmosféricos, conducciones y cualquier otro tipo de instalaciones susceptibles de originar proyectiles primarios).
- Un flujo de radiación térmica superior a 5 kW/m<sup>2</sup> independientemente del espectro de emisión con un tiempo máximo de exposición de 3 minutos.
- Para concentraciones de sustancias tóxicas en aire superiores al límite inmediatamente peligroso para la vida y la salud (IPVS), es decir, la máxima concentración en la que en un plazo de 30 minutos, un sujeto expuesto puede escapar sin síntomas graves ni efectos irreversibles para la salud. Se recomienda utilizar los valores indicados por ACGH y publicados en la NTP 293 (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo).

Asimismo, para delimitación de la **Zona de Alerta**, se considerarán los siguientes valores umbrales o circunstancias:

- Un valor local integrado del impulso, debido a la onda de presión, de 100 mbar·s (10000 Pa·s).
- Una sobrepresión local estática de la onda de presión de 50 mbar (5000 Pa).
- El alcance máximo de proyectiles con un impulso superior a 10 mbar·s en una cuantía del 99,9%, producidos por explosión o estallido de continentes.
- Un Flujo de Radiación Térmica de 3 kW/m<sup>2</sup>.

- Para concentraciones de sustancias tóxicas en aire y en función del producto involucrado en el accidente, se tendrán en cuenta los criterios que se expondrán en la guía técnica de la directriz básica.

Para su evaluación debe recurrirse a modelos de vulnerabilidad de las personas por accidentes mayores: método Probit expuesto en la NTP 291 (véase el punto 9.5 Nivel y distancia de seguridad de esta Tesis).

La Tabla 11.7 muestra las consecuencias que puede ocasionar una sobrepresión.

	Diferencia de presiones $\cdot P$ (bars)	Distancia al centro explosión	
		método del equivalente TNT	estudios experiment.
Zona de daños graves e importantes	> 0,3	< 37	< 59
Zona de daños medios	0,2 – 0,3	37 – 38	59 – 81
Zona de daños medios a ligeros	0,1 – 0,2	48 – 80	81 – 135
Zona de daños ligeros	0,05 – 0,1	80 – 155	135 – 234
Zona de daños muy ligeros	< 0,05	> 410	> 522

Tabla 11.6. Consecuencias que ocasionan las sobrepresiones



## 11.6 Cálculos experimentales

### Supuesto: deflagración de una nube de propano (vapor no confinado)

Considerando para este supuesto los datos del supuesto 1 del capítulo 7 de esta tesis: Evaporación de líquidos inflamables y gases licuados, evaluar los riesgos por la deflagración de una nube de propano no confinada causada por la rotura del tanque de almacenamiento.

Producto:	propano
Depósito:	cilíndrico horizontal
Cantidad:	80000 kg propano
$C_p$ :	2,45 kJ/(kg·K)
$T_{\text{ebull}}$ :	-42 °C = 231 K
T:	20 °C = 293 K
$\Delta H_{\text{vap}}$ :	429 kJ/kg
$\Delta H_{\text{comb}}$ :	46389 kJ/kg
Calor combustión TNT:	4520 kJ/kg

Después del derrame, la cantidad de propano líquido que se evapora y que por tanto interviene en la deflagración se determina mediante una simplificación de la ecuación [7.12], la cual se comenta en el punto 7.6 del capítulo 7.

$$F_V = C_p \frac{T - T_{\text{ebull}}}{\Delta H_{\text{vap}}} = 2450 \frac{293 - 231}{429000} = 0,35 \rightarrow 35 \%$$

$F_V$ : fracción vaporizada de propano derramado

Este resultado no coincide con la realidad en cuanto que no ha tenido en cuenta el líquido arrastrado en forma de gotas pequeñas (aerosol) durante la evaporación. En base a lo comentado en el punto 7.6, el resultado que se aproxima más a la realidad es el doble del valor obtenido:

$$F_V = 2 \cdot 0,35 = 0,70 \rightarrow 70 \%$$

La masa de la nube formada que intervendrá en la deflagración será pues:

$$M = 80000 \frac{70}{100} = 56000 \text{ kg}$$

y el rendimiento-eficacia de la explosión  $Y_f$  tiene un valor aproximado de 0,03 (según indica Zabetakis en las tablas del punto 11.3 de este capítulo).

No obstante, para cálculos de evaluación de consecuencias, la norma NTP 321 – Explosiones de nubes de vapor no confinadas: evaluación de la sobrepresión, recomienda considerar un rendimiento máximo, normalmente  $Y_f = 0,1$  (= 10 %).

Obtenido el valor de  $Y_f$ , mediante la ecuación [11.1 bis] se puede obtener la masa equivalente de TNT (trinitro tolueno):

$$m_{\text{TNT}} = 56000 \frac{46389000}{4520000} 0,1 = 57473 \text{ kg} = 126706 \text{ lib.}$$





La zona de intervención ( $S_p = 125 \text{ mbar} = 1,813 \text{ psi}$ ) corresponderá a la siguiente distancia, según [11.2]:

$$D_{SP} = (126706)^{\frac{1}{3}} \exp \left[ 3,5031 - 0,7241 \ln 1,813 + 0,0398 (\ln 1,813)^2 \right] = 1099,8 \text{ pies}$$

$$D_{SP} = 335 \text{ m}$$

y la zona de alerta ( $S_p = 50 \text{ mbar} = 7,25 \cdot 10^{-1} \text{ psi}$ ) corresponderá a la siguiente distancia:

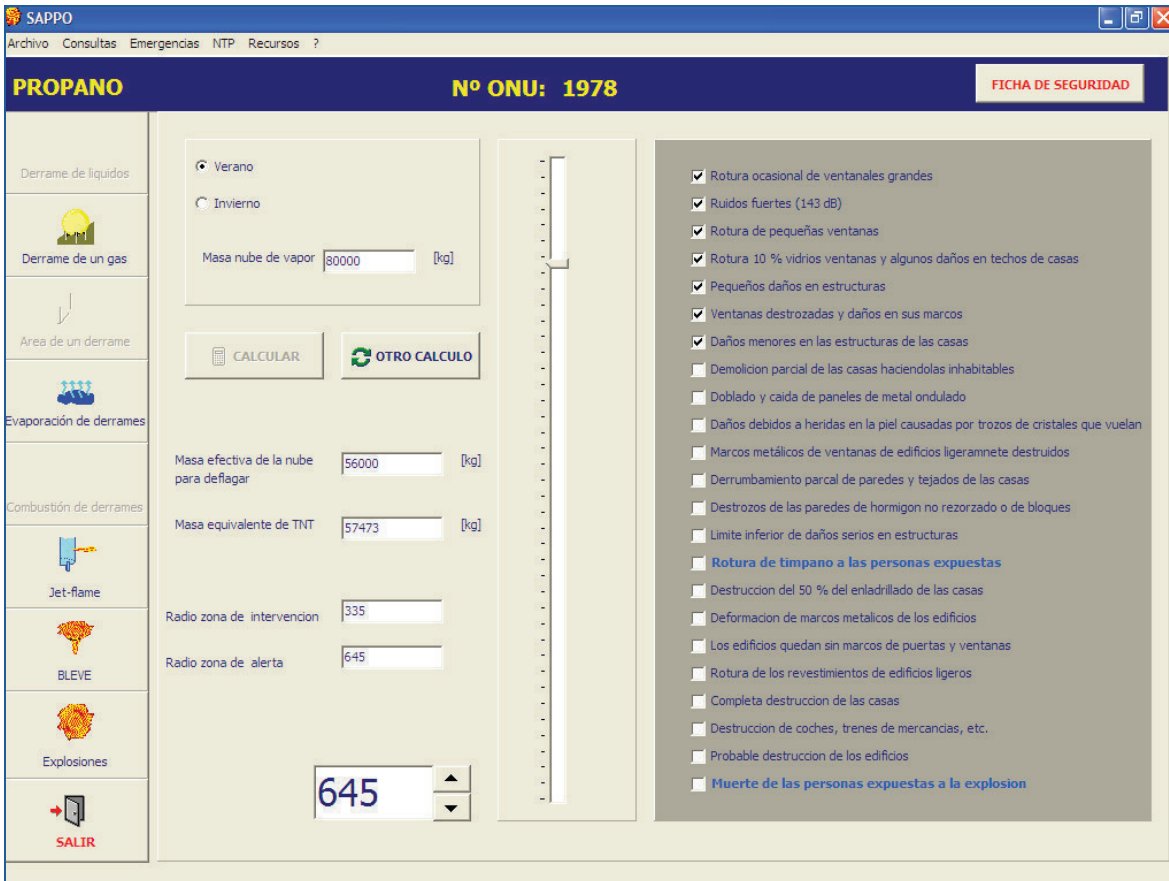
$$D_{SP} = (126706)^{\frac{1}{3}} \exp \left[ 3,5031 - 0,7241 \ln 7,25 \cdot 10^{-1} + 0,0398 (\ln 7,25 \cdot 10^{-1})^2 \right] = 2114,6 \text{ pies}$$

$$D_{SP} = 645 \text{ m}$$

En este supuesto, el uso del programa informático APPO aporta las siguientes ventajas:

- No hay que recurrir a hojas de cálculo para determinar la evolución de los diferentes parámetros de la bombona en función del tiempo.
- Da la información global de todo el proceso: evaporación "flash", influencia de la temperatura y tipo de suelo, radiación solar y velocidad del viento.
- Mayor rapidez de cálculo.
- Más seguridad en las operaciones matemáticas (no equivocaciones).
- Aporta las constantes físico-químicas de la materia peligrosa implicada en el accidente que son necesarias para realizar los cálculos.
- Los resultados junto con los "datos de inicio" aparecen todos en una misma pantalla: toda la información en un único campo visual.
- Permite enlazar los resultados a posibles nuevas situaciones: área del derrame, incendio, explosión, etc.

El Esquema 11.1 muestra la pantalla de entrada y salida de datos de una simulación con el Modelo APPO.



Esquema 11.1. Pantalla de entrada y salida de datos de una simulación con el Modelo APPO.

**Técnicas de intervención  
en las emergencias  
de Materias Peligrosas.**

CAPÍTULO  
**12**



## 12.1 Principales riesgos de las Materias Peligrosas

Atendiendo a la definición de materias peligrosas dada en el capítulo 1, todas ellas llevan asociado un riesgo específico, y cada una tiene sus propias características Físico-químicas, requiriendo por lo tanto un tipo de actuación específica, que puede ser función, también, del tipo de incidente en el que se encuentra involucrada.

A grandes rasgos, los principales riesgos con los que se pueden encontrar los equipos de intervención en un incidente donde haya implicadas materias peligrosas son los siguientes:

**Fuego:** Cuando existe fuego hay que tener en cuenta qué tipo de agente extintor se debe utilizar, y si se puede echar agua. En determinadas ocasiones, es mejor no extinguirlo.

**Explosión:** La posibilidad de explosión irá asociada la mayoría de las veces al tipo de recipiente, contenedor, y estado del producto. Un caso particular es la BLEVE, que puede producirse, principalmente por contacto directo de las llamas sobre un recipiente donde haya un gas licuado. El caso de los explosivos es diferente ya que el riesgo de explosión va asociado al producto y normalmente puede producirse la explosión por una acción exterior.

**Fugas de gas, nube tóxica:** Puede producirse por la fuga de un gas nocivo o por los productos de combustión. Es importante controlar la dirección y la zona donde se pueden manifestar los efectos.

**Fuga de líquidos tóxicos, inflamables, corrosivos:** El principal riesgo, aparte del de inflamación, es el contacto de las personas con el producto y sus efectos contaminantes por infiltración en subsuelo, alcantarillas, etc.

**Radiaciones:** Generalmente producidas por sustancias radiactivas, debe controlarse la radiación soportada.

**Contaminación:** Puede producirse por sustancias radiactivas. Deben protegerse las vías respiratorias y la piel según el tipo de sustancia. Otro tipo de contaminación es la que puede agredir al medio ambiente, en forma de contaminación del aire, agua y/o tierra.

## 12.2 Mitigación de accidentes que involucran Materias Peligrosas

Teniendo un pleno conocimiento de las características físico-químicas de las materias peligrosas, las acciones a tomar por los equipos de intervención ante una emergencia se clasifican en las siguientes operaciones físicas y/o químicas:

**Adsorción.** Hoy día se utilizan productos absorbentes existentes en el mercado. Es aconsejable disponer de un absorbente polivalente; la sepiolita en general da buenos resultados. Una vez utilizado el adsorbente, este debe considerarse como un residuo.

**Cubrimiento.** Es una de las acciones a realizar rápidamente y que ayuda a reducir los efectos.

**Dilución.** En las sustancias miscibles con el agua ayuda a bajar el riesgo a niveles seguros.

**Retención.** Es importante que los productos no se extiendan y puedan llegar a las alcantarillas, cauces de ríos, etc. Pueden retenerse formando diques de contención, barreras, etc.

**Dispersión de vapor.** Cuando existen nubes tóxicas, debe utilizarse agua pulverizada para mitigar su efecto y/u orientar la nube hacia otras zonas con menos riesgo para la población.

**Sobre-empaquetamiento.** Este método puede ser muy bueno y rápido si se dispone de otro recipiente (hermético), de un tamaño superior al afectado.

**Taponamiento.** Es uno de los métodos más utilizados por los equipos de intervención; a parte de las cuñas neumáticas, cojines, etc. son muy útiles las cuñas de madera o de teflón y las pastas para taponar fugas.

**Trasvase.** El trasvase de un recipiente a otro requiere de un material y técnica que normalmente ha de ser efectuado por los responsables, de la distribución del producto. Los equipos de intervención generalmente solo lo podrán realizar cuando las cantidades sean pequeñas y se disponga del material necesario: bombas, recipientes de contención, etc.

**Supresión del vapor.** Cuando una sustancia produce vapores, puede cubrirse con espuma para evitar la producción de vapor.

**Venteo.** El venteo consiste en abrir una válvula del depósito para reducir la presión en su interior, reduciéndose así la presión de salida del líquido o gas por el punto de fuga, y permitiendo taponar o reducir la fuga.

**Relicuaición.** Este método consiste en re-licuar la fuga de un gas licuado, instalando un conducto de PVC, manguera, etc. en la salida y conducirlo hasta un depósito, tapado con una lona, donde se vuelve a licuar el gas. Este método es muy indicado para el amoníaco.

**Combustión controlada.** Es un método a tener en cuenta cuando el riesgo que puede producirse es superior al daño producido por el incendio. Por



ejemplo una fuga de gas natural, o un incendio de doruro de vinilo. En estos casos es mejor limitarse a proteger a terceros y no extinguir el incendio hasta estar seguros de reducir u obturar la fuga.

**Neutralizar.** Se utiliza principalmente para ácidos y bases, para formar una sal. Este método para realizarlo *in situ* es difícil, siendo mejor utilizar un método de adsorción.



### 12.3 Técnicas de mando

La gestión de recursos, humanos y materiales, en las intervenciones de emergencia, requiere la coordinación de todos los efectivos disponibles en cortos espacios de tiempo, debiendo de ser efectivos, rápidos, seguros y tener en todo momento un control de la situación. Para ello, es necesario disponer de una sistemática clara y rápida que permita una correcta toma de decisiones.

El MANDO juega un papel fundamental en estas situaciones, por lo que debe prepararse y formarse adecuadamente, para la situación de emergencia, y para las situaciones que la anteceden:

#### **En el Parque (pre-planing).**

Es necesario estar preparado para las emergencias. Por ello hay que desarrollar y preparar todo aquello que posteriormente pueda simplificar o facilitar la intervención. De entre todas podemos destacar:

- Fichas de itinerarios con información adicional: es muy útil disponer de fichas donde se indique el itinerario desde el Parque, hasta la calle donde hay que prestar el Servicio, disponiendo además de información como: bocas de riego, depósitos de agua, instalaciones radiactivas, estaciones

transformadoras, gasolineras, edificios singulares, instalaciones de columna seca, accesos cerrados por mobiliario urbano, etc.

- Protocolos de intervención: establecer los criterios a seguir en el auxilio, según las características de la solicitud de socorro. Desarrollar las maniobras para cada tipo de intervención, especificando que debe hacer cada miembro del equipo y qué material debe de coger.
- Preparación del material: deben de realizarse prácticas continuamente para conocer las posibilidades y prestaciones del material. Cada relevo debe comprobar que todo el material funciona correctamente, y que se encuentra en perfecto estado y completo.
- Información complementaria: disponer de las fichas de intervención de Materias Peligrosas en todos los vehículos de primera intervención.
- Conocimiento del entorno: un conocimiento previo del lugar puede facilitar considerablemente la intervención. Es conveniente establecer en los servicios una **prevención operativa**, realizando visitas a edificios o actividades singulares, donde se observaran los accesos, instalaciones contra incendios existentes, zonas de almacenamiento, acometidas eléctricas o de gas, vías de evacuación, peligros objetivos, etc.
- Planes de emergencia: muchas actividades, deben de tener un plan de emergencia y de autoprotección. Es necesario que los equipos de intervención estén informados y que realicen simulacros con los responsables de los planes de emergencia para una implantación correcta.
- Juicio crítico de los servicios realizados: una vez en el parque, es conveniente realizar un juicio crítico de la intervención realizada,

analizando los problemas encontrados, y estudiando otras posibilidades de actuación, etc.

Un juicio crítico bien hecho, ayuda a mejorar las futuras intervenciones y a la cohesión del grupo.

### **En la emergencia (sistemática de toma de decisiones IEDO)**

La sistemática a seguir para la toma de decisiones y su implantación en las emergencias se basa en los siguientes cuatro puntos, conocidos habitualmente como IEDO:

- Información
- Evaluación
- Decisión (plan de actuación)
- Ordenes (implantación del plan de actuación)

### **INFORMACION**

Inicialmente, cuando se recibe una llamada de auxilio, se debe de obtener el máximo de información posible sobre el tipo y magnitud del incidente, personas implicadas, dirección correcta, números de teléfono, etc. Hay que asegurar un mínimo de datos para poder realizar la salida con los equipos y material adecuados.

Toda la información disponible será transferida al mando de los vehículos que se dirigen al lugar del incidente, el cual informará al personal que va en los vehículos y establecerá un protocolo de actuación.

Cuando se llega al lugar del siniestro, hay que verificar el incidente (incendio, fuga, derrame, accidente, etc.), localizar las amenazas (llamas, humo, nube tóxica, líquido corrosivo, contaminación, etc.) y verificar la extensión del incidente (tamaño, velocidad de propagación si la hay y dirección).

Asimismo el mando debe de estudiar todo el entorno del lugar del incidente (vías de acceso y posibilidades de evacuación), las condiciones climatológicas (niebla, lluvia, nieve, sol, bajas temperaturas, etc.), orografía del terreno, pendientes, etc., localizar los recursos efectivos del lugar (instalaciones contra incendios en el lugar, columnas secas, BIES, hidrantes, etc.) y verificar las personas implicadas:

- Directamente afectadas y que necesitan ayuda para poder salir.
- Amenazadas indirectamente, pueden salir por sus medios o quedarse confinadas.
- No amenazadas, pero pueden serlo según la evolución del incidente.

## EVALUACION

La información obtenida será determinante para poder evaluar la magnitud del incidente y la respuesta que se le debe dar.

Los criterios de evaluación a seguir son los siguientes:

- Medidas inmediatas que hay que realizar y pueden ser determinantes, por ejemplo salvar personas atrapadas en un incendio, cerrar el suministro del gas, etc.
- Factores del lugar del siniestro, que pueden dificultar o favorecer la intervención por ejemplo: el incendio está en un piso muy alto donde no se

tiene acceso con las auto-escaleras, no hay acceso para los vehículos de emergencia, etc.

- Problemas que pueden existir en la intervención: peligro de colapso de la planta, nave o edificio, explosión, posible creación de BLEVE, contaminación, radiación, etc.
- Objetivos a cumplir: voy a rescatar a las personas, a extinguir un incendio, a taponar la fuga, etc.
- Métodos y técnicas a emplear para poder cumplir los objetivos.
- Se debe tener en cuenta la anticipación.
- Quienes deben estar implicados.

#### DECISION, PLAN DE ACTUACION

Con la información obtenida y la evaluación de la situación, hay que tomar una decisión y establecer un PLAN DE ACTUACION. Para esto:

- Hay que determinar las acciones a realizar con prioridad, salvamento, extinción, evacuación, etc.
- Que método utilizaremos en la actuación que podrá ser ofensiva (se ataca directamente el incidente) o defensiva (se limita la progresión del incidente y se protege a terceros).

Según las características del incidente, los equipos de intervención se pueden encontrar con diferentes tipos de actuación:

- i.** Actuaciones para un incidente pequeño con recursos suficientes que requiere de una actuación ofensiva. Por ejemplo el incendio de un contenedor, el incendio de la campana de una cocina doméstica, etc.
  - ii.** Actuaciones para un incidente limitado con recursos pequeños que requiere de una actuación ofensiva-defensiva. Por ejemplo en el incendio de un almacén y si sólo disponemos de un vehículo, podemos escoger la acción ofensiva de atacar directamente el fuego o la acción defensiva de evitar la progresión, proteger a terceros y esperar refuerzos.
  - iii.** Actuaciones para un incidente grande con inferioridad de recursos que requiere de actuación defensiva. Por ejemplo una nave industrial quemando totalmente, en este caso hay que ubicar los medios de que se disponen del mejor modo posible, para evitar la propagación y daños a terceros.
  - iv.** Actuaciones para un incidente limitado pero con los medios justos, o con ligera inferioridad. Este tipo de actuación requiere un elevado nivel de mando y control para poder elegir entre una actividad ofensiva o defensiva.
- Se debe establecer el nivel de protección del personal que interviene y determinar las zonas de actuación. Dichas zonas son:
  - zona caliente (zona de riesgo).
  - zona templado (zona ubicación medios).
  - zona fría (zona segura).



## ORDENES (IMPLANTACIÓN DEL PLAN DE ACTUACION)

Con la información obtenida y evaluada, tomadas unas decisiones y elaborado un plan de actuación, el mando sabe lo que quiere hacer y como, pero si las ordenes no son claras y bien transmitidas, la aplicación del plan de actuación puede ser una utopía. Las consideraciones a tener en cuenta son las siguientes:

- Los objetivos tienen que ser claros y asegurarse de que son comprendidos.
- En las maniobras tipo, cada operario debe de tener establecidas de antemano sus funciones. La ventaja de las maniobras tipo en una intervención, es la de permitir al mando pensar cual será la segunda maniobra a realizar.
- Es importante saber delegar funciones, según el tipo de incidente se podrá delegar por zonas de actuación. También se puede delegar por tareas, extinción, salvamento, alimentación, etc.
- Deben quedar claramente señalizadas las zonas de riesgo, intervención, seguras y el nivel de protección.
- Establecer el puesto de mando avanzado (PMA), es el lugar desde donde se llevara el mando de la intervención y se gestionaran la solicitud de refuerzos, distribución de los nuevos efectivos, etc.
- Solicitar recursos estableciendo punto de encuentro y canal de comunicación con el PMA.
- Establecer canales de comunicación.

El mando de la intervención, debe de estar situado en un lugar en el que tenga una completa visión de todo lo que está ocurriendo durante la intervención. Donde pueda detectar si el fuego se extiende, si hay que hacer otra instalación de mangueras, obtener más información, etc.

### **Durante la intervención**

Una vez se ha decidido el plan de actuación y se está aplicando, hay que controlar la evolución del incidente:

- Control del personal trabajando con ERA (Equipo de Respiración Autónoma); existen diversidad de medios y formas de hacerlo. Algunas de ellas.
  - i. Tablas de control y placas de identificación. Al utilizar un ERA se entrega una placa donde se anota el nombre, presión de la botella, hora y lugar donde se va a intervenir. Esta placa se entrega a un operario que es quien controla según los consumos medios, a qué hora debe salir y periódicamente solicita presiones y ajusta/modifica la hora de salida, avisa cuando queda poco tiempo.
  - ii. Alarmas personales. Este equipo permite activar la alarma cuando se necesita ayuda o cuando se esta inmovilizado durante 30 segundos.
  - iii. El Mando o un operario está en el exterior comunicado con el equipo interior y pendiente de ellos.

- Control de las acciones-tareas que se están realizando, tales como extinción, salvamento, contención, etc.
- Evolución del siniestro, tal como si se ha limitado, si se esta reduciendo, los objetivos se están cumpliendo, etc.
- Plan SOS. Hay que prever un plan SOS. Siempre que haya un equipo trabajando con ERA deberá haber otro preparado para intervenir en caso de necesidad, solicitar la presencia de una ambulancia y personal sanitario. Hay que prestar especial atención con el equipamiento de seguridad personal durante la intervención.
- Información CECO-SEIS (Centro de Control, Servicio Extinción Incendios y Salvamento). Hay que informar al centro de control a la llegada sobre la descripción y confirmación del siniestro. Durante la intervención hay que informar de su evolución.
- Comunicaciones. Hay que establecer los canales de comunicación con los equipos de intervención, mando de la intervención con CECO-SEIS y recursos en camino. CECO-SEIS con otros Servicios implicados.
- Reevaluar el plan de actuación. A medida que los objetivos se van realizando o variando, hay que reevaluar la situación y modificar el Plan de actuación si es necesario.

Por otro lado, si la intervención es de cierta magnitud, es normal que exista la necesidad de efectuar el relevo del mando, por la llegada de nuevos refuerzos y/o un mando superior o por la larga duración de la intervención. En estos casos se deberá tener en cuenta:

- El mando relevado debe informar de forma clara y resumida del servicio y sobre el estado en que se encuentra. Dicha información debe incluir:
  - i.** Tipo de incidente.
  - ii.** Plan de actuación.
  - iii.** Objetivos realizados y pendientes.
  - iv.** Recursos solicitados.
  - v.** Canales de comunicación.
  - vi.** Peligros objetivos de la intervención.
  
- El nuevo mando. Una vez crea que ya dispone de toda la información necesaria, debe de comunicar cuando asume el mando de la intervención. El nuevo mando, puede reevaluar la situación y modificar el Plan de Actuación, ahora bien, en todo momento debe de quedar claro a los intervinientes quien lleva la dirección de la intervención.

## 12.4 Protocolos de intervención con materias peligrosas

No hay que olvidar en ningún momento cuales son los principios de actuación de los equipos de intervención de emergencias:

- salvar vidas humanas: debe ser la prioridad cuando se llega al lugar del servicio.
- el ataque necesita más fuerza que protección.
- limitar y atacar; es importante que a partir de la llegada de los equipos de intervención, el siniestro se limite.
- la rapidez en la actuación es garantía de éxito.
- solicitud de los medios necesarios cuando se detecte la necesidad de algún recurso no disponible.

A continuación, se adjuntan varias propuestas de protocolos de actuación, que cada servicio debe adaptar a su estructura. Como base se ha tomado una dotación por vehículo de: un mando, un conductor y tres operarios.

## 1. Planteamiento del lugar de intervención

Para el planteamiento de una intervención con materias peligrosas, se deberán tener en cuenta los siguientes puntos:

- Dirección del viento: la dispersión a una velocidad inferior a 2 m/s es circular y a una velocidad superior es en forma de pluma. Siempre hay que situarse en la dirección del viento.
- Marcar las zonas, caliente (riesgo), templada (instalaciones con equipos de intervención) y fría (segura). La zona caliente, debe de tener unos 50 m, y debe señalizarse la entrada y salida (riesgo).
- Establecer la ubicación del PMA (puesto de mando avanzado)
- Establecer la ubicación de los vehículos, y vías de salida.
- Establecer a la salida de la zona caliente la de descontaminación si es necesaria.
- Las acciones a realizar por los recursos humanos serán:
  - i.** Equipo de intervención
  - ii.** Equipo SOS
  - iii.** Control intervención
  - iv.** Equipo descontaminación
  - v.** Equipo alimentación (conductores)
  - vi.** Mando de la intervención

## 2. Maniobra de descontaminación:

Para la maniobra de descontaminación, se deberán tener en cuenta los siguientes puntos:

- Señalización de la zona donde se realiza la descontaminación.
- Establecer una entrada y una salida.
- Disponer de un depósito hermético, para el material utilizado, a la entrada de la zona de descontaminación, y otro en la salida, para la colocación de los trajes utilizados.
- La zona de descontaminación, estará preparada para una ducha de lavado como mínimo.

## 3. Maniobra básica de un vehículo:

- El conductor se encargará de extender una manguera de 70 mm con una bifurcación, en dirección a la intervención, y posteriormente se encargará de la alimentación (aprovisionamiento de agua) del vehículo.
- 2 operarios formarán el equipo de intervención, instalarán como mínimo dos mangueras de 45 mm y una lanza difusora, y se encargarán de la extinción del incendio.
- 1 operario instalará dos mangueras y una lanza difusora, y las dejará instaladas en la dirección del fuego. De esta manera, puede un solo operario actuar, al no tener que arrastrar los dos tramos de manguera. Será el encargado de controlar al equipo de intervención, accionará las llaves de la bifurcación y actuará como equipo SOS.

- El mando de la intervención, deberá establecer el plan de actuación, los niveles de protección y zonas de actuación. Comunicará las incidencias al CECO-SEIS.

#### **4. Maniobra básica con dos vehículos.**

El personal del primer vehículo desarrollará la maniobra básica de un vehículo.

El personal del segundo vehículo se encargará de instalar el equipo SOS y la descontaminación, si fuera necesaria. El control de la intervención, y posteriormente la descontaminación, deben ser realizadas por el mando del segundo vehículo. El mando del primer vehículo será el mando de la intervención.

Hay que tener en cuenta que la instalación de intervención y la del SOS se alimentan de vehículos diferentes.

#### **5. Maniobra de aproximación.**

Esta maniobra se realiza para la aproximación cuando es necesario cerrar una válvula de una instalación, abrir un contenedor, efectuar un salvamento de una persona envuelta entre las llamas, etc.

Se utilizará la sistemática básica para cada vehículo. Debe tenerse en cuenta la alimentación independiente para cada línea de mangueras. El mando del segundo vehículo se situará en el centro de las dos líneas y ordenará el avance. Las dos líneas de mangueras y el mando deben estar juntos sin separarse. Una vez efectuado el cierre de la válvula, etc. el mando se dará la vuelta y guiará a los operarios que retrocederán de espaldas, no dejando en ningún momento de tirar agua.



Esta maniobra exige mucha coordinación entre el personal, por lo que es necesario practicarla para tener la garantía de su correcto funcionamiento.

## **6. Maniobra de extinción con espuma.**

Esta maniobra se puede realizar de diversas maneras, tales como la alimentación de espumógeno por la bomba de un vehículo, por un hidromezclador instalado en la línea de manguera, etc.

La maniobra que se presenta sigue el mismo criterio de distribución de personal por vehículo. La instalación con hidromezclador, intercalado, permite un mejor aprovechamiento del espumógeno, tiene el inconveniente de estar continuamente pendiente de los bidones de espumógeno.

Se debe disponer de dos líneas de actuación y alimentarse desde vehículos diferentes. Se montará en cada línea otra de SOS.

## **7. Maniobra con trajes de protección N-3, N-2.**

Esta maniobra es una de las más complejas por la cantidad de tareas a realizar. Requiere por la tanto de una buena coordinación y entrenamiento, para realizarla con rapidez.

El equipo de intervención estará formado por cuatro operarios, dos efectuarán la reducción o taponamiento de la fuga y dos actuarán como protección para dispersar o diluir la nube tóxica.

El personal de control y SOS debe estar equipado con el mismo nivel de protección que los intervinientes.

El montaje de la descontaminación debe realizarse paralelamente con la colocación de los trajes de protección.

Debe controlarse el tiempo de la actuación con equipos de protección. Como norma hay que estimar unos 10 minutos efectivos de actuación, y hay que prever el tiempo necesario para la descontaminación. Es mucho más efectivo y seguro disponer de trajes de protección con posibilidad de alimentación exterior de aire.

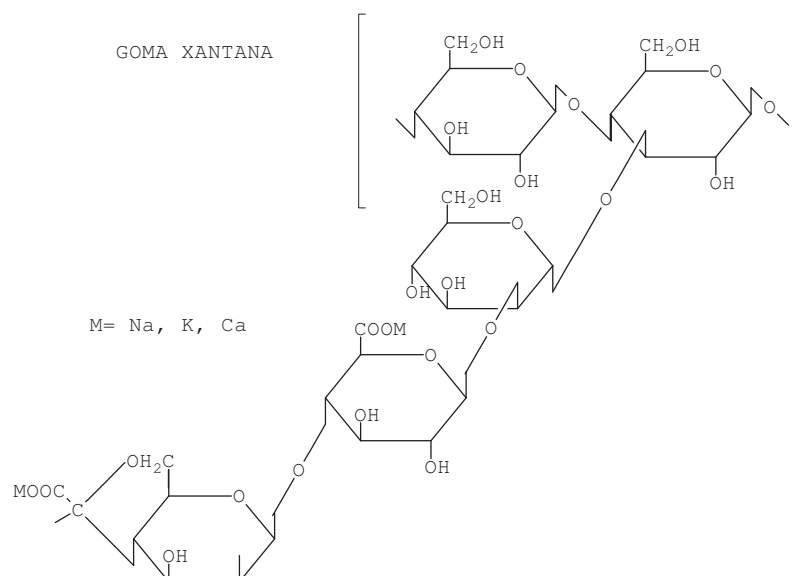
ANEXO

**Goma Xantana.**



## A I - Goma Xantana

La goma xantana (aditivo alimentario E-415) es un polímero glucosídico producido por fermentación del *Xanthomonas campestris* sobre sustrato glucídico, que está constituido por una cadena lineal de  $\beta$ -D glucosa unida en (1-4), que lleva en su mitad una ramificación lateral con dos residuos de glucosa. Las cadenas laterales están constituidas por  $\alpha$ -D ramosa, ácido glucurónico y  $\alpha$ -D ramosa como terminal. Alrededor de la mitad de los residuos terminales de ramosa tienen ácido pirúvico quelatado entre el C-4 y el C-6. La ramosa no terminal está acetilada en el C-6.



Para la preparación de las disoluciones descritas en el tema 3 y dada la complejidad que implica el disolver la goma Xantana a escala industrial, se tuvo que usar una máquina agitadora-homogeneizadora modelo Industrias Vía – 1000 con agitador de turbina a 2820 rpm y un motor de 3 CV.

**Expansión adiabática  
de gases perfectos.**

**A N E X O**





## A II - Expansión adiabática de gases perfectos

La aplicación del Primer Principio de la Termodinámica a un sistema que se expande sin intercambio de calor con el exterior ( $dQ = 0$ ), se reduce a la siguiente expresión:

$$dE = dQ + dW \longrightarrow dE = dW$$

que en cantidades molares corresponde a la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{\partial e}{\partial T} dT = -P dv \quad [\text{AII.1}]$$

donde cada una de las formas de energía se ha expresado como el producto de dos variables, una extensiva y otra intensiva. Así, para el caso concreto del trabajo mecánico:  $dW = -Pdv$ , siendo  $P$  la variable intensiva y  $dv$  (volumen molar) la extensiva.

Recordando también la definición que nos da la termodinámica clásica (Diaz M., Roig A. 1985) de la capacidad calorífica ( $c_v$ ) a partir de las ecuaciones de *Gibbs-Helmoltz*:

$$c_v = \left( \frac{\partial e}{\partial T} \right)_v \quad [\text{AII.2}]$$

la expresión del primer principio queda reducida a la siguiente ecuación diferencial:

$$c_v dT = -P dv = -\frac{RT}{v} dv = -RT \frac{dv}{v}$$

$$c_v \frac{dT}{T} = -R \frac{dv}{v} \quad \therefore \quad c_v d \ln T = -R d \ln v \quad [\text{AII.3}]$$

que integrando y aplicando la igualdad de Mayer ( $R = c_p - c_v$ ) nos da:

$$c_v \ln T = (c_v - c_p) \ln v \quad \therefore \quad \ln T^{c_v} = \ln v^{(c_v - c_p)} \quad \therefore \quad T^{c_v} = v^{c_v - c_p} \quad [\text{AII.4}]$$

de la que se deduce:

$$\left( \frac{Pv}{R} \right)^{c_v} = v^{c_v - c_p} \quad ; \quad \frac{Pv}{R} = v^{\frac{c_v - c_p}{c_v}} \quad ; \quad Pv^{\frac{c_p}{c_v}} = R = \text{cte.} \quad [\text{AII.5}]$$

y aplicada a la expresión [AII.5], la relación de capacidades caloríficas  $\gamma$ , resulta:

$$Pv^\gamma = \text{cte.} \quad [\text{AII.6}]$$

**Razón de temperaturas  
en una expansión adiabática  
de gases perfectos.**

A N E X O



### A III - Razón de temperaturas en expansión adiabática de gases perfectos

El conocimiento de la razón de temperaturas o de presiones en una expansión adiabática de gases perfectos es de suma importancia al tener que expresar las velocidades y caudales en función del número de Mach.

Así pues, partiendo de la ecuación resultante del Anexo II, y de la ecuación de los gases perfectos:

$$\frac{P_0}{P_1} = \frac{v_1^\gamma}{v_0^\gamma} = \left( \frac{\frac{RT_1}{P_1}}{\frac{RT_0}{P_0}} \right)^\gamma = \left( \frac{P_0 T_1}{P_1 T_0} \right)^\gamma$$

Que operando resulta:

$$\frac{T_1}{T_0} = \left( \frac{P_1}{P_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$



**Líquidos inflamables.**

ANEXO  
**IV**





## A IV

Se denominan **líquidos inflamables** aquellos líquidos, mezclas de líquidos o líquidos que contienen sustancias sólidas en solución o suspensión (por ejemplo pinturas, barnices, lacas, etc, siempre que no se trate de sustancias incluidas en otras clases debido a sus características peligrosas) que despiden vapores inflamables a una temperatura no superior a 100 °C.

Desde el punto de vista del riesgo que presentan en base a su punto de inflamación, y atendiendo a su número de identificación de peligro (ADR), los líquidos inflamables se clasifican en:

- **Líquidos muy inflamables** (nº peligro en panel naranja 33).- su punto de inflamación se encuentra por debajo de 21 °C.
- **Líquidos inflamables** (nº de peligro en panel naranja 30).- su punto de inflamación se encuentra situado entre 21 °C y 100 °C.

Además hay que tener presente que existe cierto número de líquidos inflamables que junto al riesgo de inflamabilidad presentan otros riesgos asociados como el de ser tóxicos en mayor o menor medida, poseer cierto grado de corrosividad o presentar una reactividad especialmente violenta.



En cualquier caso, el número de productos que presentan estos riesgos añadidos es, porcentualmente, muy inferior al de los líquidos inflamables que no lo presentan, por lo que no serán considerados en este anexo.

## A IV – Glosario. Características físico-químicas

Existen una serie de características físico-químicas que es conveniente tener en cuenta de cara a una intervención de emergencia en la que se hallen involucrados líquidos inflamables.

**Presión de vapor.-** Cuanto mayor sea la presión de vapor del líquido, mayor será, a una temperatura determinada, la cantidad de vapores inflamables que de éste emanen y, por tanto, mayor será el riesgo de una potencial inflamación. En justa medida, se deberán extremar las medidas de protección controlando de forma más estricta todas las posibles fuentes de ignición.

Un ejemplo sencillo se establece entre la gasolina y el gasoil. La presión de vapor de la gasolina es de 190 mm Hg a 20 °C, mientras que la del gasoil es de tan sólo 2,6 mm Hg a 50 °C. Como se sabe, es mucho más fácil que se inflame un derrame de gasolina que uno de gasoil, hecho que es debido, principalmente, a la mayor presión de vapor de la gasolina, que lleva consigo una mayor emanación de vapores.

**Punto de ebullición.-** Se denomina punto de ebullición a la temperatura a la cual se iguala la presión de equilibrio del vapor de un líquido con la presión atmosférica total

existente en su superficie. El **punto de ebullición normal** será aquella temperatura a la cual una sustancia pasa de líquido a vapor a la presión de 1 atmósfera.

El punto de ebullición está inversamente relacionado con la presión de vapor, de modo que, sustancias con una elevada presión de vapor presentan un bajo punto o temperatura de ebullición.

El poseer un bajo punto de ebullición supone dificultades añadidas a la hora de la extinción. Así, ciertos terpenos y éteres arden con una considerable ebullición de la superficie del líquido presentando una muy difícil extinción.

**Punto de inflamación.-** Es la temperatura mínima a la que un líquido desprende suficiente cantidad de vapores para que, en contacto con el aire, se forme una mezcla capaz de arder en las proximidades de la superficie del líquido.

Cuanto menor sea la temperatura de inflamación, mayor para el riesgo de que se produzca un incendio en caso de accidente y, por tanto, se deberán extremar las medidas de precaución, en especial, ampliando la zona de riesgo y realizando un control más exhaustivo de las posibles fuentes de ignición.

**Punto de autoinflamación.-** Es la mínima temperatura por encima de la cual una mezcla de vapores inflamables, en presencia de aire, son susceptibles de inflamarse sin necesidad de una fuente de ignición externa. Lógicamente, a menor temperatura de autoinflamación, existe un mayor riesgo de que se produzca una combustión no deseada.

**Rango de inflamabilidad.-** Cuanto más amplio sea el mismo, y dependiendo de cuales sean sus valores límites concretos, mayor será el riesgo de que los vapores sean susceptibles de ser inflamados en una atmósfera, local o situación determinada.

Un gran número de productos, entre los cuales se incluyen varios de uso muy frecuente como la gasolina, el gasoil, o el tolueno, presentan valores para su límite inferior y superior de inflamabilidad que se sitúan en torno al 1% para el primero y el 7% para el segundo. Otros líquidos inflamables, en cambio, presentan valores bien distintos, como es el caso del alcohol metílico con un 7% para L.I.I. y un 36% para L.S.I.

**Densidad de un líquido.-** La inmensa mayoría de los líquidos inflamables son menos densos que el agua, de forma que, en cualquier situación, en la que entren en contacto con ella misma tenderán a situarse en la superficie. Así pues, se debe considerar esta circunstancia cuando, por una u otra razón, un derrame de estos productos alcance el mar, un río o cualquier otra área con presencia de agua.

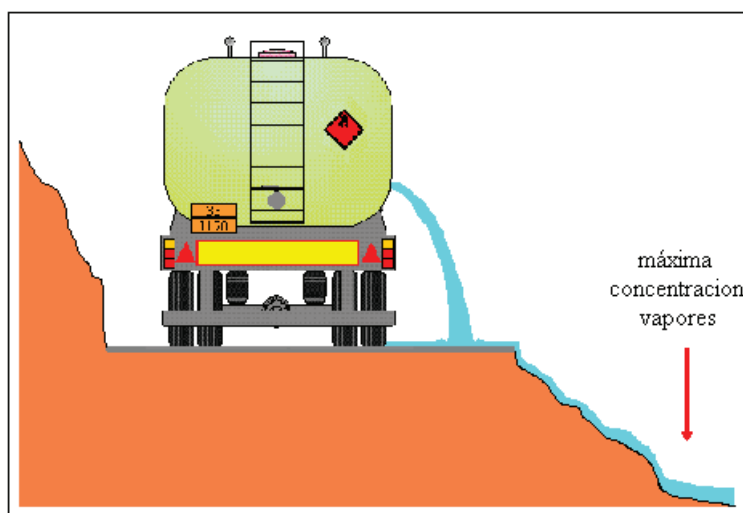
El sulfuro de carbono es uno de los pocos líquidos inflamables con mayor densidad que el agua, y además no soluble en ésta. Los fuegos en los depósitos y derrames de estos productos pueden ser extinguidos por la separación de sus vapores y el aire mediante la formación de una capa de agua sobre los mismos.

**Solubilidad en el agua.-** Existen líquidos inflamables solubles y no solubles en el agua. La mayoría de los alcoholes, la acetona, y otros, pertenecen al primer grupo. Los hidrocarburos, en cambio, suelen ser no solubles en el agua, siéndolo en disolventes orgánicos.

Considerando este aspecto se puede prever el comportamiento que tendrá un determinado producto cuando se ponga en contacto con agua. Una consecuencia clara de este hecho es la conveniencia de emplear espuma conocida como *antialcohol* en el derrame de líquidos inflamables solubles en agua.

Frente a líquidos solubles en agua también se puede emplear la extinción por dilución con agua. La solución resultante, líquido-agua, es menos volátil que el líquido sólo, según el grado de dilución con el agua, y la combustión puede cesar por dejar de haber una cantidad suficiente de vapores inflamables. Sin embargo, no puede confiarse comúnmente en la extinción por dilución debido a la gran cantidad de agua que se puede necesitar para conseguir este objetivo. Además, existe el riesgo de que pueda producirse una espumación si el líquido incendiado alcanza una temperatura superior a la temperatura de ebullición del agua.

**Densidad de los vapores.-** La inmensa mayoría de los líquidos inflamables desprenden vapores que son más densos que el aire. Éste es un hecho que se ha de tener presente ya que los citados vapores se situarán en las zonas más bajas del terreno, pudiendo dar lugar a bolsas susceptibles de ser inflamadas en caso de aporte de una fuente de ignición. La Figura A IV.1 muestra un derrame de un líquido inflamable cuyos vapores son más pesados que el aire.



**Figura A IV.1.** Derrame de líquido inflamable cuyos vapores son más pesados que el aire.

## A IV - Riesgos de los líquidos inflamables

Los riesgos asociados a los líquidos inflamables son los siguientes:

**Calor radiado.-** Producido como consecuencia de la combustión de los líquidos inflamables. Este calor obliga a la utilización de ropas de protección adecuadas, así como a la refrigeración de contenedores que hayan podido ser o estén siendo afectados por el mismo.

El calor radiado depende principalmente de la cantidad (superficie) de combustible inflamado y del poder calorífico del mismo. Así mismo, la radiación es mayor cuanto mayor sea también la cantidad de impurezas que el líquido posea. En este sentido, la combustión de los alcoholes suele producir una menor cantidad de calor radiante por tratarse de líquidos con muy pocas impurezas, al contrario de lo que ocurre con productos como la gasolina o el gasoil con muchos residuos sólidos.

**Ondas de presión.-** Producidas por la súbita combustión de una nube o acumulación de vapores inflamables en un lugar cerrado. Las ondas de presión parten de un foco inicial donde se originan, y se propagan en todas las direcciones del espacio.

Las explosiones de las mezclas de aire con vapores inflamables en las proximidades del límite inferior o superior de inflamabilidad son menos intensas que las que se producen con concentraciones intermedias de la misma mezcla. La violencia de las explosiones de vapores inflamables depende de la naturaleza de los vapores, de la cantidad de la mezcla, de la concentración de la misma y del tipo de confinamiento.

**Metrala.-** Generalmente van a ser los pedazos de la cisterna o del depósito que contenía el líquido inflamable o sus vapores. El calentamiento excesivo del contenedor, puede provocar un efecto de sobrepresión en el interior del mismo que, acabe dando lugar a una explosión que puede lanzar sus restos a cientos de metros del lugar donde se encontraba inicialmente.

El peligro de rotura de los tanques debido a la presión interna cuando están expuestos a un incendio depende, en gran parte, de las características del líquido, de las dimensiones

y tipo del tanque y de la intensidad y duración del fuego. Cuanto menor sea el tanque o menor el volumen del líquido en él contenido, menor será el tiempo que tardará en producirse la explosión BLEVE. La Figura A IV.2 muestra la explosión de un contenedor-cisterna con desprendimiento de metralla.



**Figura A IV.2.** Explosión de un contenedor-cisterna, con desprendimiento de metralla

**Contaminación medioambiental.-** Producida a consecuencia del derrame de estos productos en el mar, ríos, lagos, etc.; o bien, en la propia tierra donde, además de la contaminación de la misma, puede alcanzar el nivel freático y ser trasladada a grandes distancias.

Por otro lado, la gran cantidad de humo y gases producidos como consecuencia de la combustión de los líquidos inflamables ejerce, así mismo, un efecto muy perjudicial sobre la atmósfera.

**Toxicidad, corrosividad y especial reactividad.-** Como ya se ha comentado anteriormente, algunos líquidos inflamables presentan otros riesgos asociados al de inflamabilidad.

Los hidrocarburos aromáticos como el benceno, el tolueno o el xileno, poseen efectos anestésicos y sus vapores pueden provocar parálisis respiratoria. Además, muchos





compuestos aromáticos penetran a través de la piel y pueden ser adsorbidos por los tejidos del cuerpo.

El sulfuro de carbono, el sulfuro de metilo, el metanol o la acroleína, son ejemplos de líquidos inflamables que también presentan problemas de toxicidad.

La metilamina, la dietilamina y otras materias inflamables presentan el problema añadido de ser corrosivas.

El acetato de vinilo, el metacrilato de etilo, el estireno o el viniltolueno, son ejemplos de líquidos inflamables que además pueden producir espontáneamente una reacción violenta.



## A IV - Zona de intervención

La delimitación de la zona de intervención depende de múltiples factores como los vistos en el apartado de características físico-químicas, considerando además otras circunstancias como son las condiciones meteorológicas del lugar (principalmente la dirección y fuerza del viento), factores orográficos y urbanísticos, etc., los cuales afectan en gran medida a este cálculo.

Desde un punto de vista práctico, y asumiendo el riesgo que suponen las generalizaciones en este tipo de cuestiones, se establecen las siguientes zonas de intervención considerando tres situaciones de riesgo distintas:

**Situación 1ª: Derrame sin incendio.** Zona de intervención: entre 50 y 100 metros.

**Situación 2ª: Derrame con incendio, las llamas no afectan a la cisterna y el calor radiante que afecta a la misma no es muy importante.** Zona de intervención: unos 50 metros.

**Situación 3ª: Derrame con incendio afectando a la cisterna o contenedor (riesgo de explosión).** Zona de intervención: unos 300 metros. En esta 3ª



situación hay que tener presente que la zona de alerta deberá situarse en un radio no inferior a los 1000 metros, dadas las grandes distancias que pueden alcanzar los restos del contenedor en caso de producirse una explosión.

## A IV - Niveles de protección personal

En función de las tareas que estén realizando los equipos de intervención de emergencia, los niveles de protección personal adecuados son los siguientes:

**Nivel 1.-** Consiste en el traje de intervención completo y el equipo de respiración autónoma. Será la protección personal adecuada cuando se realicen labores de extinción, salvamento, etc., que no impliquen un contacto directo con el producto.

**Nivel 2.-** Se compone del mismo nivel 1 con el traje antisalpicaduras superpuesto. Se utilizará en todas aquellas acciones que impliquen un contacto directo con el producto. De forma general se empleará en la contención, el taponamiento y el trasvase del producto.

**Nivel 3.-** Consiste en el traje NBQ de protección total. Se utilizará en las acciones citadas para el nivel 2 en caso de no disponer de trajes antisalpicaduras, y siempre que el riesgo de inflamación sea mínimo.



## A IV - Normas de actuación en siniestros

De forma general, en todos los accidentes en los que se hallen involucradas mercancías peligrosas y, de forma concreta, en lo que se refiere a **líquidos inflamables**, las dotaciones que se dirijan al lugar del siniestro tratarán de aproximarse al lugar del mismo, en la dirección y sentido del viento.

Los vehículos se detendrán, con carácter general, a una distancia de unos 50 metros. Desde este punto, se realizará una rápida evaluación de la situación, incidiendo especialmente en la identificación de la materia o materias transportadas dado que, a partir de su conocimiento, las medidas a tomar en cada caso serán muy distintas.

Además, se analizará el tipo de accidente (fuga, derrame, incendio, explosión), y la presencia de posibles víctimas implicadas en el mismo, al tiempo que, se establecen las correctas medidas para una rápida evacuación y balizamiento de la zona afectada.

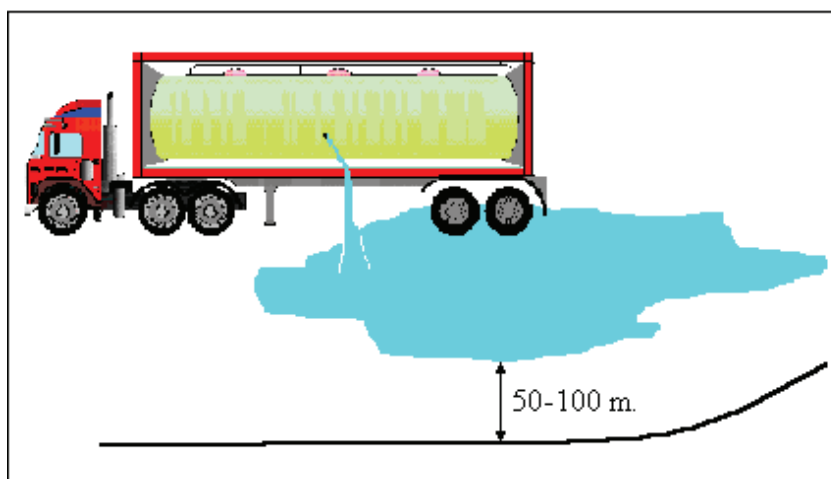
En la evaluación de la situación deberán considerarse otros factores como la dirección y fuerza del viento, la cercanía de edificios habitados o la orografía del terreno.

Una vez identificada la materia o materias implicadas y sus riesgos, se podrá delimitar, de una forma más exacta, cuales serán las medidas a emprender en función del tipo de accidente que se nos presente.

Así pues, partiendo del conocimiento de que la materia o materias implicadas en el accidente son generalmente **líquidos inflamables**, se establecen tres situaciones de riesgo que, de forma general, pueden servir de guía de actuación, si bien, en todo momento hay que ser conscientes de que cada accidente, y cada situación concreta, presenta unas peculiaridades distintas que afectan muy directamente a la medidas de actuación y que llevan consigo la toma de una serie de decisiones adecuadas a la magnitud y características concretas del siniestro.

### Situación 1ª: Derrame sin incendio.

Como corresponde a todo siniestro, en primer lugar se realizará una rápida *evaluación* del mismo. La zona de intervención se situará a una distancia de entre 50 y 100 metros. La delimitación concreta se establecerá atendiendo principalmente al producto implicado y, en particular, a la presión de vapor y el punto de inflamación del mismo. La Figura A IV.3 muestra un derrame sin incendio, con su zona de intervención entre 50 y 100 metros.



**Figura A IV.3.** Derrame sin incendio. Zona de intervención de 50 a 100 m.

Las acciones prioritarias a realizar serán el *balizamiento* de la zona de intervención, la *identificación* de la materia o materias implicadas y, por supuesto, la *evacuación* de personas y posibles heridos. En todo momento se extremarán las precauciones para evitar





la ignición del derrame. El personal que realice estas acciones deberá ir perfectamente equipado con el nivel 1 de protección, y deberá así mismo portar las correspondientes instalaciones de protección bien sea de agua, espuma o una combinación de ambas.

En esta situación, el mayor factor de riesgo se establece en la existencia de una nube de vapores inflamables en contacto con el aire y, posiblemente dentro de su rango de inflamabilidad, por lo que, de forma inmediata, se procederá a *cubrir* el derrame con la espuma adecuada. A ser posible se utilizará espuma AFFF de baja o media expansión. En el caso de que el líquido inflamable sea soluble en agua se empleará espuma de la denominada antialcohol.

En este punto hay que hacer la salvedad de que en el caso de que el producto derramado sea gasoil, u otro con similares características, el siniestro podrá considerarse, salvo circunstancias especiales, más como un problema de contaminación medioambiental que como un riesgo claro de incendio dada la baja probabilidad de que el mismo se inflame. En este sentido, no será preceptivo establecer como norma el cubrir el derrame con espuma. En cualquier caso y, ante una duda razonable acerca de las características del producto o de las peculiaridades de la situación, puede ser conveniente optar por esta medida preventiva.

Cubierto el derrame con espuma y, de este modo minimizado el riesgo de inflamación, se podrá proceder a *rescatar* las personas que hayan quedado atrapadas en el interior de algún vehículo a consecuencia del accidente.

Aparentemente se ha dejado un poco de lado la contención del derrame, pero hay que tener presente que tan pronto como sea posible, deben realizarse las maniobras precisas para *contener* el mismo, con el fin de evitar que penetre en la red de alcantarillado, cursos de agua, el mar, etc. Así mismo se avisará a las autoridades competentes en caso de que se produzca cualquiera de estos hechos u otro similar que pueda suponer cualquier tipo de riesgo a las personas o al medio ambiente.

Durante toda la intervención se controlará y mantendrá la cubierta de espuma, e incluso, con un explosímetro se comprobará el grado de sellado en la emisión de vapores inflamables.

Se intentará *taponar* el derrame empleando cualquier sistema efectivo que se tenga a disposición, pero teniendo presente que el material que se utilice no produzca chispas. Los sistemas más comunes para este fin son las cuñas de madera y los cojines tapafugas en grietas de pequeño tamaño, así como el cerrado u obturación de válvulas que hayan sido objeto de lesión.

El *trasvase* deberá realizarse de forma adecuada y preferentemente por personal especializado. Se emplearán bombas de trasiego aptas para el trasvase de líquidos inflamables y se tomará especial precaución en realizar las necesarias tomas de tierra.

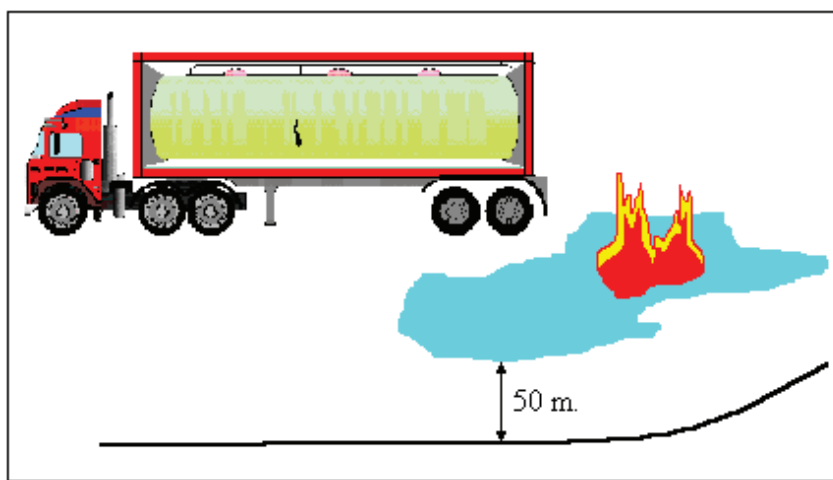
### **Situación 2: Derrame con incendio, las llamas no afectan a la cisterna y el calor radiante que afecta a la misma no es muy importante.**

En esta situación, el riesgo inmediato de que la cisterna explote por efecto de una sobrepresión en el interior de la misma es reducido. En cualquier caso, siempre se debe considerar el tiempo que el calor irradiado por el incendio puede llevar afectando a la cisterna o depósito contenedor.

De forma general, la zona de intervención será de unos 50 - 100 metros, siempre que se considere que no hay ningún riesgo inmediato de explosión.

Al llegar al lugar del siniestro se procederá a realizar una rápida *evaluación* de la situación. Se establecerán como medidas prioritarias la *identificación* del producto, el *balizamiento* de la zona de intervención y el *rescate* y la *evacuación* de personas y heridos.

En el caso de que existan personas atrapadas a consecuencia del siniestro, la rapidez va a ser vital de cara a evitar que las mismas puedan perecer a causa del incendio. La Figura A IV.4 muestra un derrame con incendio en el que las llamas no afectan al contenedor-cisterna y la zona de intervención de 50 metros de anchura.



**Figura AIV.4.** Derrame con incendio en el que las llamas no afectan al contenedor cisterna. Zona de intervención de 50 m.

Además, dado el no exento riesgo de calentamiento del contenedor, desde los primeros instantes de la actuación, se establecerán las instalaciones de agua suficientes para proteger tanto al personal interviniente como para *refrigerar* la cisterna o tanque de forma continua e ininterrumpida hasta que el riesgo haya desaparecido. De forma simultánea, se procederá a *sofocar* el incendio empleando preferentemente espuma de baja expansión o polvo extintor.

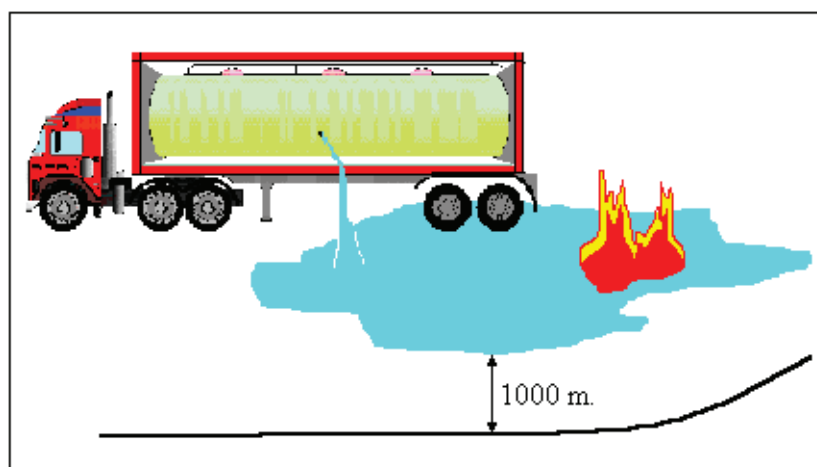
Extinguido el incendio se *cubrirá* el derrame con una capa de espuma apropiada, la cual deberá ser controlada y mantenida. A partir de este punto, se procederá a *contener* el derrame y, en caso necesario, taponar y trasvasar el producto tratando de alcanzar, tan pronto como sea posible y si las circunstancias lo permiten, una situación estable tanto en lo que se refiere al producto como al contenedor del mismo.

### Situación 3: Derrame con incendio afectando a la cisterna o contenedor (riesgo de explosión).

Ésta es la situación más crítica de cuantas nos podemos encontrar en un accidente con líquidos inflamables.

En este caso, la *valoración* deberá ser más profunda, analizando de forma seria la probabilidad de que la cisterna pueda explosionar y afectar al personal interviniente. En el otro lado de la balanza habrá que sopesar la presencia de posibles víctimas en la zona de riesgo. En función de estos dos factores, principalmente, el mando a cargo de la intervención establecerá la táctica a seguir.

En el supuesto caso de que la cisterna o tanque esté en una zona deshabitada, no haya personas en las inmediaciones, y el fuego lleve largo tiempo afectando a la misma, la decisión a tomar podrá ser más conservadora, procediendo a evacuar la zona en un radio no inferior a 1 kilómetro. En el mejor de los casos, se emplazarán monitores para lanzar agua sobre la cisterna con el fin de reducir el grado de calentamiento de la misma, así como espuma para tratar de extinguir el derrame inflamado. La Figura A IV.5 muestra un derrame con incendio en el que las llamas afectan al camión-cisterna y la zona de intervención de 1000 metros de anchura.



**Figura A IV.5.** Derrame con incendio en el que las llamas afectan al contenedor cisterna. Zona de intervención de 1000 m.

Ahora bien, si en esta situación de riesgo hay implicadas posibles víctimas en las inmediaciones, la decisión a tomar será mucho más complicada.

En este caso, se plantean dos opciones contrapuestas. La primera, supone asumir el riesgo del personal interviniente con el fin de salvar las posibles personas que, con vida, hayan podido quedar en la zona de riesgo. La segunda, en cambio, consistirá en retirarse y evacuar la zona limítrofe al accidente, dando por perdida la situación y el hecho de que todavía queden personas con vida en las inmediaciones del mismo.

La difícil decisión deberá tomarse basándose principalmente en los signos que muestre la cisterna o tanque en tanto en cuanto al riesgo de explosión y, en la presencia de víctimas con vida en el área afectada.

En el caso que el riesgo de explosión sea inminente se procederá a alertar a la población y a evacuar las personas que se hallen dentro de la zona de riesgo que no será inferior a un kilómetro de radio.

Si se opta por rescatar a las víctimas, se actuará de forma enérgica, tratando de refrescar la cisterna con todo el caudal de agua disponible, al tiempo que se apantalla la radiación producida por el incendio. Rápidamente, se procederá a realizar la evacuación y el salvamento de las víctimas que se hallen con vida.

En todo momento, se realizará una continua *reevaluación* de la situación observando como evoluciona la cisterna o tanque y, en caso de riesgo inminente de explosión, se dará la orden de retirada de todo el personal interviniente.

Controlada y estabilizada la situación, se procederá a extinguir y cubrir con espuma el derrame, sin dejar de refrescar la cisterna hasta que de signos de que no sufre ningún síntoma de calentamiento.



A partir de este punto, se procederá como en los casos precedentes a realizar la contención, taponamiento y trasvase del producto.

**Gases:  
su problemática específica.**







**AV**

El término gas, describe el estado físico de una materia que no tiene forma ni volumen propios, sino que se adapta a la forma y volumen del continente. Puesto que todas las sustancias pueden adoptar el estado gaseoso, según la temperatura y presión que se les aplique, el término **gas** se emplea a las sustancias que existen en estado gaseoso en condiciones ambientales, es decir, a temperaturas y presiones aproximadamente de 21°C y 1 atm.

Tanto el almacenamiento como el transporte de un gas presurizado o refrigerado implica el riesgo de que, si se libera de su depósito de almacenamiento o contenedor por accidente, multiplica cientos de veces su volumen, agravando por su condición de gas el riesgo de sus propiedades químicas:

- inflamabilidad
- reactividad
- toxicidad
- dispersión en la atmósfera
- la mayoría de gases son invisibles



Los cálculos de dispersión de la nube, teniendo en cuenta la velocidad del viento y las condiciones meteorológicas pueden dar una idea aproximada de las zonas donde se encuentra el peligro (aunque en algunos casos se ha comprobado un 500% de error) así como las concentraciones, permitiendo asegurar la ausencia de gas en los puntos de medición, aunque las variaciones en unos pocos metros pueden ser muy grandes.

En todos estos casos (en algunas ocasiones, el riesgo para la población puede ser tan grande como la imposibilidad de evacuación en los pocos minutos en los que se produce la dispersión, y en otras, la contención es tan sencilla como la colocación de una lona sobre la fuga o el taponamiento del contenedor con una cuña), una intervención inmediata de los equipos de intervención y un rápido acceso a las bases de datos del servicio permiten minimizar considerablemente el siniestro.



## A V - Clasificación

Para poder encasillar en una clasificación todos los tipos de gases, hay que tener en cuenta todos los denominadores comunes que reflejen sus propiedades químico-físicas.

### **Clasificación según sus propiedades químicas**

Las propiedades químicas son las más importantes, ya que son las que reflejan la capacidad que tiene el gas de reaccionar químicamente con otras materias produciendo subproductos potencialmente peligrosos o grandes cantidades de calor:

#### **Gases inflamables**

Se considera gas inflamable, a cualquier gas que pueda arder en condiciones normales de oxígeno en el aire. La combustión de los gases inflamables en el aire está sujeta a las mismas condiciones que los vapores de los líquidos inflamables; es decir, cualquier gas inflamable, entrará en combustión sólo dentro de ciertos límites de composición de la mezcla de gas-aire (límites de inflamabilidad o combustibilidad) y a una cierta temperatura necesaria para iniciar la reacción (temperatura de ignición).



Aunque los vapores de los líquidos inflamables y los gases inflamables muestran idénticas características de combustión, el término Punto de Inflamación, prácticamente no tiene significado en lo que se refiere a los gases. El Punto de inflamación es básicamente la temperatura en la que un líquido inflamable produce suficiente cantidad de vapores para que se produzca la combustión. Dicha temperatura, está siempre por debajo de su punto de ebullición normal, mientras que los gases inflamables se encuentran normalmente a una temperatura superior a la de su punto de ebullición normal, incluso cuando son transportados en estado líquido.

Un ejemplo, lo constituirían el Butano, Hidrógeno, Acetileno, etc.: gases que arden, no son respirables, y que pueden formar mezclas explosivas con el aire.

### **Gases no inflamables**

Son los que no arden bajo ninguna concentración de aire o de oxígeno. Sin embargo, muchos de estos gases sí pueden mantener la combustión de otras materias, o al contrario, otros tienden a sofocarla.

Los que mantienen la combustión, se llaman generalmente **oxidantes**, y están formados por mezclas de oxígeno con otros gases como Helio, Argón, etc.

Entre los gases que no mantienen la combustión y que generalmente se llaman gases **inertes**, los más comunes son el Nitrógeno, Argón, Helio, Dióxido de carbono y Dióxido de azufre, aunque no debe olvidarse que algunos metales pueden reaccionar vigorosamente en atmósferas de Nitrógeno o Dióxido de carbono, como por ejemplo el Magnesio.



### **Gases reactivos**

Como la mayor parte de los gases pueden estar destinados a reaccionar químicamente con otras sustancias bajo ciertas condiciones, el término **gas reactivo** se emplea para distinguir los gases que reaccionan con otras materias o con sí mismos, produciendo grandes cantidades de calor o productos de reacción potencialmente peligrosos, mediante una reacción distinta de la combustión y bajo condiciones de iniciación razonablemente previsibles (calor, impacto, etc.). Un ejemplo de gas altamente reactivo es el Flúor, que reacciona con prácticamente todas las sustancias orgánicas e inorgánicas a temperaturas y presiones normales, y generalmente a suficiente velocidad como para producir llamas. Otro ejemplo es la reacción del Cloro (clasificado como gas no inflamable) con el Hidrógeno (gas inflamable), que también puede producir llamas.

Varios gases pueden reaccionar químicamente con ellos mismos cuando se les somete a condiciones fácilmente previsibles de calor e impacto, incluida la exposición al fuego, con producción de grandes cantidades de calor, como son el Acetileno, el metil-acetileno, el Propano-dieno y el Cloruro de Vinilo. Estos gases se encuentran generalmente en recipientes mezclados con otras sustancias para su transporte y almacenamiento; a veces se conservan en recipientes especiales para estabilizarlos contra posibles iniciadores de reacción.

### **Gases tóxicos**

Ciertos gases pueden representar cierto riesgo para las personas si se liberan en la atmósfera. En esta categoría se incluyen los que resultan venenosos o irritantes al inhalarlos o al entrar en contacto con la piel, tales como el Cloro, el Acido sulfhídrico, Dióxido de azufre, Amoniaco o el Monóxido de carbono. La presencia



de tales gases puede complicar seriamente las medidas de lucha contra incendios si los bomberos están expuestos a su acción.

### **Clasificación según sus propiedades físicas**

Éstas propiedades tienen gran importancia para la protección y lucha contra incendios, puesto que afectan al comportamiento físico de los gases, tanto mientras permanecen en sus recipientes como cuando se liberan accidentalmente. Por su naturaleza, los gases deben estar totalmente encerrados en recipientes para su transporte, manipulación y almacenamiento hasta el momento de su empleo. Por cuestiones de economía práctica y facilidad de empleo, es necesario que los gases se envasen en recipientes que contengan la mayor cantidad posible de gas, lo cual tiene como resultado la adopción de medidas para aumentar la presión de los gases hasta el punto de que el transporte sea licuado en muchas ocasiones, y pocas veces sea únicamente en fase gas.

#### **Gases comprimidos**

Se le llama gas comprimido, a aquel gas que a temperatura ambiente y bajo presión dentro de un recipiente conserva su estado gaseoso. Son aquellos gases o mezclas de gases, cuya temperatura crítica es menor o igual a  $-10^{\circ}\text{C}$ .

#### **Gases licuados**

Es el que a temperaturas normales y bajo presión, se presenta en fase líquida y parcialmente en fase gas. La presión depende fundamentalmente de la temperatura del líquido. Son aquellos cuya temperatura crítica es mayor o igual a  $-10^{\circ}\text{C}$ .



### **Gases criogénicos**

Se llaman gases criogénicos a aquellos gases que para mantenerse licuados en el interior de su envase deben encontrarse a unas temperaturas muy por debajo de las temperaturas normales, generalmente por encima de su punto de ebullición a temperatura y presión normales, y a presiones proporcionalmente bajas o moderadas. La principal razón de esta diferencia respecto al gas licuado, es que el gas criogénico no puede mantenerse indefinidamente en el recipiente que lo contiene debido a que éste no puede impedir la penetración del calor de la atmósfera, que tiende continuamente a elevar su presión hasta un nivel que puede llegar a exceder la resistencia de cualquier tipo de recipiente.

Son aquellos gases cuya temperatura de ebullición a presión atmosférica es inferior a  $-40^{\circ}\text{C}$ .

### **Gases disueltos a presión**

Este es el caso cuyo representante sería el Acetileno. El acetileno, es un gas que no se puede presurizar si no está en unas condiciones muy especiales. Necesita de un envase relleno de una masa porosa, en la cual se le añade Acetona. En el momento de realizar la carga de acetileno, éste se disuelve en la Acetona y se distribuye en los intersticios de la masa porosa (interior).

Lo característico de estos gases es que no se conservan en estado libre, sino que se disuelven en otro medio, en general a causa de su reactividad.







## A V - Transporte

No siempre es conveniente o económico el fabricar determinados productos que sirvan de base para conseguir un tercero. Es por eso que en muchas ocasiones esos productos deben ser transportados de un lado a otro con el fin de cubrir las necesidades de cada uno de los fabricantes, almacenistas o detallistas que los precisen.

Las formas de transporte son múltiples y varían según el producto y el consumo que de él se haga. Así pues, los hidrocarburos en sus distancias largas, son transportados mediante oleoductos que unen las refinerías con los almacenes de distribución al mayor (en el caso de Mallorca, se encuentran comunicados mediante oleoducto el *dique del oeste* en el muelle de Palma con la factoría de CLH sita en Porto Pi y Son Banya, y las pistas del aeropuerto de Son San Juan). El gas natural es otro ejemplo de transporte mediante tuberías, uniendo ya continentes, como es el caso del reciente gasoducto que parte de la mitad norte de África y que, recorriendo distintos centros de producción y consumo por toda Europa, se adentra en el continente Asiático.

Sin embargo no hay que olvidar que al final de la "cadena", casi siempre aparece el transporte por carretera o ferrocarril, mediante vehículos destinados a tal fin y que son los encargados del transporte desde los muelles de los puertos, las estaciones ferrocarriles de descarga, los aeropuertos, etc., hasta los centros de consumo de los citados productos.



Tomando las estadísticas se observa que en el transporte por carretera, frente a los demás medios, la cantidad global de productos que puedan representar algún peligro y son transportados por carretera es del 53,7%. Y si a esto se le suma la siniestralidad potencial de los vehículos que circulan por carretera, nos damos cuenta de la importancia de la adecuada preparación que deben tener el personal destinado a mitigar los siniestros que, con infinidad de productos, se producen en nuestras carreteras.

### **Transporte por carretera - ADR**

Hay varias maneras de transportar gas a granel por carretera. Un gas puede comprimirse en un contenedor a presión, o puede licuarse enfriándose. Cuando se presurizan algunos gases, como por ejemplo el Propano, se licúan, permitiendo así el transporte de mayor cantidad de gas.

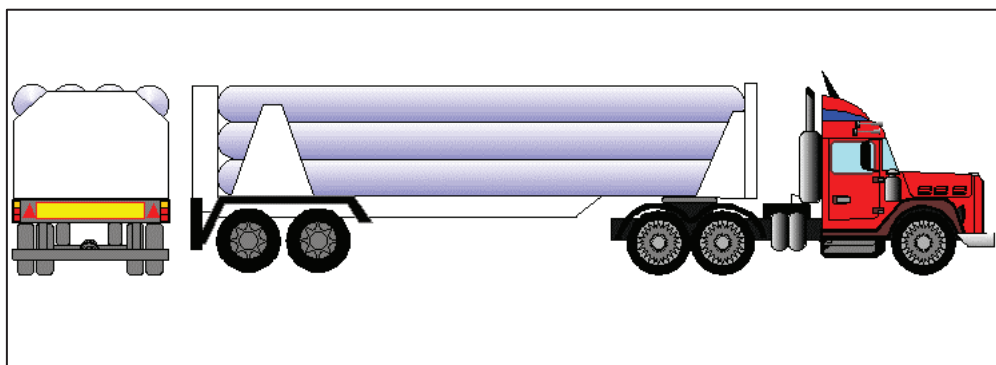
Otros, como puede ser el Acetileno, necesitan estar disueltos en un líquido y con unos envases especiales para poderse comprimir, y otros, como por ejemplo el Hidrógeno, permanecen en estado gaseoso aunque se les presurice.

#### **Transporte por carretera en estado gaseoso:**

Los tráileres con botellas pueden llevar de una a doce botellas. Cada botella posee una válvula de descarga que está conectada con las otras botellas mediante un colector, de manera, que permite la descarga de toda la batería actuando únicamente sobre una válvula de descarga.

Cada botella dispone de una válvula de sobrepresión para aliviar cualquier sobrepresión producida tanto por causas naturales como accidentales. En algunos casos, sin embargo, estas válvulas están encapsuladas en sombreretes, en los cuales pueden quedar atrapados los gases. Los productos que habitualmente se transportan en este tipo de envases, son el Hidrógeno, Helio, el Nitrógeno, el

Argón y el Dióxido de carbono. El Esquema A V.1 muestra la parte trasera y lateral de un tráiler con botellas de gases.



**Esquema A V.1.** Parte trasera y lateral de un tráiler con botellas de gases.

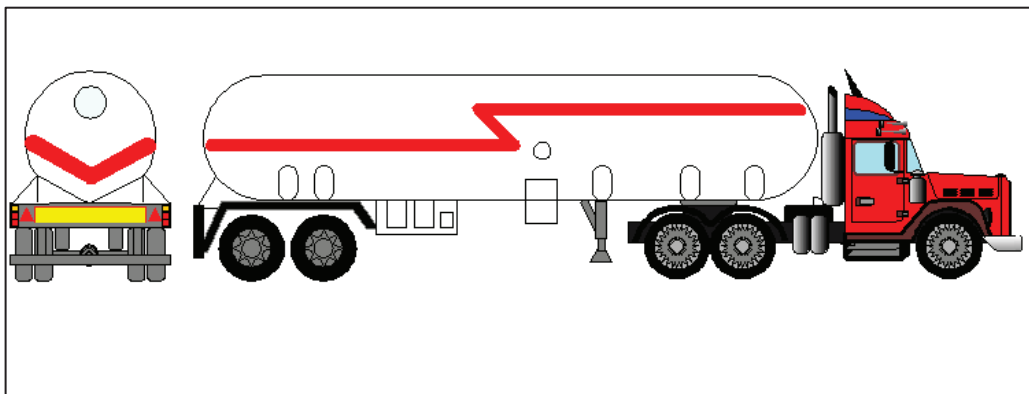
Una variedad específica, dedicada a transportes muy especiales, son las esferas de transporte sólidamente unidas sobre un camión de plataforma fija. Son transportes relativamente reducidos en Europa, que aunque existen, son bastante escasos. Normalmente están formadas por dos o tres esferas preparadas para el transporte de gases a altas presiones. Un ejemplo es el Acido Clorhídrico en estado gaseoso, a presión.

### **Transporte por carretera de gases licuados a presión.**

Los gases pueden licuarse por efecto de la presión, como por ejemplo el Propano, Amoniaco, Dióxido de azufre, Cloro, etc.

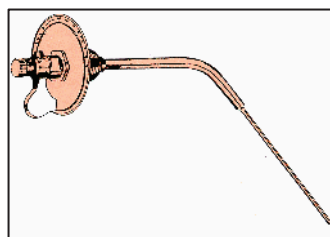
Los depósitos para el transporte de gases licuados a presión constan de un único compartimento cilíndrico ojival, con rompeolas interiores para reducir el movimiento del producto durante el transporte. Su estructura exterior es una pieza simple de acero al carbono y con un elevado límite elástico (hasta 27 Kg/cm<sup>2</sup> en el supuesto generalizado de diámetros iguales o superiores a 1,5 metros, y de 30 Kg/cm<sup>2</sup> en cisternas de menor diámetro). El espesor de la pared suele ser de 1

cm. aproximadamente, y cuenta con válvulas de sobrepresión (válvulas de seguridad), normalmente del tipo resorte o muelle tarado que previenen un aumento de presión por encima de 120% de la presión normal de trabajo, que están situadas en la parte superior del depósito o tanque (en ocasiones 1 unidad de producto licuado puede dar lugar hasta 700 unidades de gas). El Esquema A V.2 muestra la parte trasera y lateral de una cisterna dedicada al transporte de gases comprimidos.



**Esquema A V.2** Parte trasera y lateral de una cisterna dedicada al transporte de gases comprimidos.

En las cisternas de transporte de gases licuados, generalmente GLP, también se instala una válvula antirrebose, también denominada "galga rotativa", que se utiliza para avisar de que se ha alcanzado el nivel máximo de carga permitido; esto se nota porque se forma hielo o escarcha en la salida del tubo. . El Esquema A V.3 muestra una válvula antirrebose.



**Esquema A V.3.** Vista de una válvula antirrebose.



Dichas válvulas están protegidas, en el caso de que el vehículo vuelque, para que resistan una carga estática en cualquier dirección igual al doble del peso de la cisterna, mas su equipo cuando está cargado con el producto. Además está equipado con una protección trasera, diseñada para proteger el tanque y tuberías en el caso de colisión por la parte trasera.

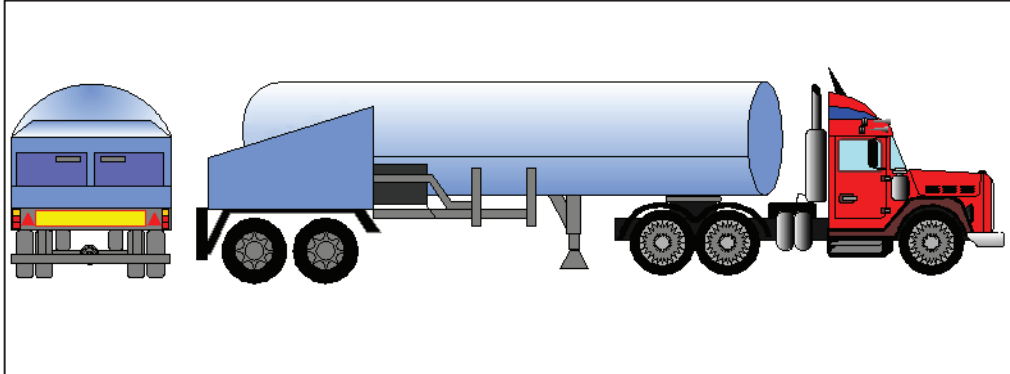
Para reducir la absorción de calor radiante durante el transporte, las cisternas han de estar recubiertas con aluminio, acero estirado u otro metal brillante y sin coloración. Además deben estar pintadas 2/3 partes del tanque en color blanco, aluminio u otro color reflectante.

### **Transporte de gases criogénicos**

Los gases criogénicos, son gases licuados procedentes de la destilación fraccionada del aire, que se transportan y almacenan como líquidos a temperaturas que pueden llegar a ser inferiores a los  $-100$  °C. Los más comunes son el Nitrógeno, Oxígeno, Flúor, Metano, etc.

Los tanques de almacenamiento de gran capacidad son del tipo de doble pared, siendo en el interior de acero inoxidable austérmico o acero al 95 de Níquel y el exterior de acero al carbono, sirviendo de intercámara como elemento aislante, con o sin vacío en el interior de la misma, Así se logra un aislamiento térmico adecuado que mantiene el líquido a temperaturas próximas al punto de ebullición, además de contar con registradores continuos, válvulas de alivio y discos de rotura, que impiden que la presión suba por encima de la máxima presión de trabajo del tanque.

El Esquema A V.4 muestra la vista trasera y lateral de un tráiler provisto de un tanque de almacenamiento de gran capacidad.



**Esquema A V.4.** Vista trasera y lateral de un tráiler provisto de un tanque de almacenamiento de gran capacidad.

El transporte se realiza en cisternas del tipo de doble pared que incorporan válvulas de sobrepresión y discos de rotura, y con aislamiento de alto vacío en la intercámara, que además, está rellena de perlita, un superaislamiento para mantener un adecuado aislamiento térmico. El líquido se mantiene a temperaturas lo más bajas posibles para mantener la presión de trabajo a  $2 \text{ Kg/cm}^2$  aunque pueden encontrarse suministros a alta presión que pueden llegar a los  $18 \text{ Kg/cm}^2$ .

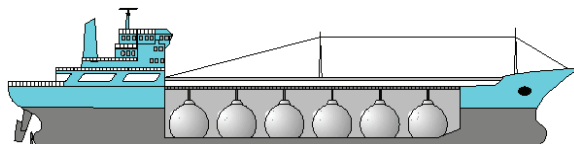
### **Transporte por vía marítima y fluvial - IMO**

Como resultado del creciente consumo de hidrocarburos y de productos químicos entre los países, el método de embarque ha cambiado de paquetes a contenedores para grandes cantidades. Varios países convencidos de que los buques no reunían las condiciones necesarias de seguridad para la tripulación, el puerto y el medio ambiente, contra los hidrocarburos y productos químicos con propiedades distintas a la inflamabilidad, solicitaron a IMO que desarrollase un código referente al diseño, construcción y funcionamiento de transportadores de productos químicos, el cual entró en vigor en 1986.

La gran variedad de productos que se transportan por vía marítima, hace que se defina todo un conjunto de buques especializados para cada modo de transporte:

### Barcos de GLP totalmente presurizados

El Esquema A V.5 muestra las principales características de un buque de transporte de GLP.



**Esquema A V.5.** Principales características de un buque de transporte de GLP.

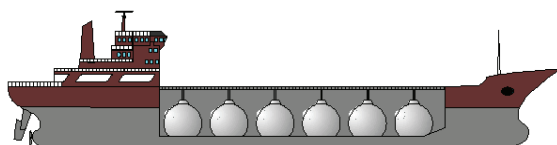
La presión de trabajo media, es de unos 17,5 Kg/cm<sup>2</sup>.

Capacidades aproximadas de carga es de 4.000 m<sup>3</sup>.

Transporte de Butano, Propano y mezclas de GLP.

### Barcos semirefrigerados:

El Esquema A V.6 muestra las principales características de un buque de transporte semirefrigerado.



**Esquema A V.6.** Principales características de un buque de transporte semirefrigerado.

La presión de trabajo es de 6,5 kg/cm<sup>2</sup>

Cuenta con aislamiento térmico y planta de relicuefacción.

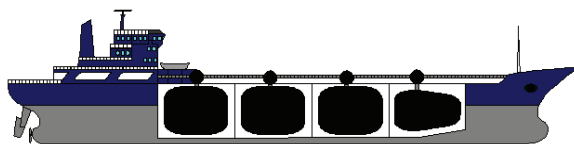
Temperaturas de -10°C.

Capacidad aproximada de 7.500 m<sup>3</sup>.

Transporte de GLP.

### Barcos semipresurizados/refrigerados:

El Esquema A V.7 muestra las principales características de un buque de transporte semipresurizado/refrigerado.

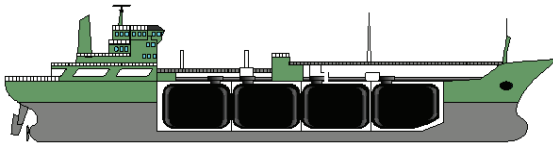


**Esquema A V.7.** Principales características de un buque de transporte semipresurizado/refrigerado.

Abarcan desde una presión media de 6,5 kg/cm<sup>2</sup> a una temperatura de hasta -48 °C (la mayoría de GLP y gases químicos). Transporte de una amplia gama de gases, desde mezclas GLP al Cloruro de Vinilo, Propileno y Butadieno.

### Barcos de GLP totalmente refrigerados.

El Esquema A V.8 muestra las principales características de un buque de transporte de GLP totalmente refrigerado.



**Esquema A V.8.** Principales características de un buque de transporte de GLP totalmente refrigerado.

La presión de transporte se corresponde aproximadamente con la presión atmosférica.

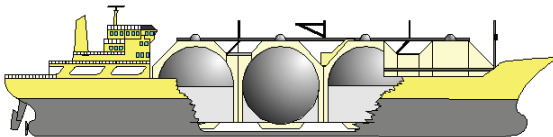
La temperatura puede llegar a  $-48^{\circ}\text{C}$ .

Capacidades entre 10.000 y 50.000  $\text{m}^3$ .

Aislamiento térmico y planta de relicuefacción.

### Barcos de GNL (gases naturales licuados) totalmente refrigerados.

El Esquema A V.9 muestra las principales características de un buque de transporte de GNL totalmente refrigerado.



**Esquema A V.P8.** Principales características de un buque de transporte de GNL totalmente refrigerado.

Diseñados para transportar grandes volúmenes de GNL. Su punto de ebullición es de  $-163^{\circ}\text{C}$ .

El transporte es criogénico y se mantiene a la temperatura de ebullición única y exclusivamente por el aislamiento .

La capacidad es de 120.000 a 130.000  $\text{m}^3$ .

### Transporte por tuberías

El gas procedente de los yacimientos o de las plantas de regasificación debe hacerse llegar a los lugares de consumo, no solamente con la calidad adecuada sino con el caudal suficiente para satisfacer la demanda y a presión (constante) adecuada para el





funcionamiento de los aparatos. Ello se consigue mediante canalizaciones, que transportan el gas a diferentes presiones, unidas entre sí a través de estaciones reguladoras.

De este modo, si se desea hacer circular un elevado volumen de gas a través de una tubería, existen dos soluciones:

- construirla con un diámetro muy grande
- comprimir el gas y usar tuberías más pequeñas

donde lógicamente, la segunda solución es la más eficaz. Para cada caudal existe una presión y diámetro de tubería óptimas, y para cada presión unas exigencias técnicas adecuadas, de ahí que existan diferentes tipos de redes de transporte y distribución de gas, cuyas características han sido reguladas por la administración, a través del "Reglamento de redes y acometidas de combustibles gaseosos", y cuya clasificación es la siguiente:

- Redes de alta presión Tipo B (APB), para presiones superiores a 16 bars. Son específicas para el transporte a grandes distancias.
- Redes de alta presión Tipo A (APA), para presiones entre 4 y 16 bars. Son para transporte y suministro a usuarios especiales (centrales térmicas, fábricas, etc.).
- Redes de media presión Tipo B (MPB), para presiones entre 0,4 y 4 bars. Se usan para alimentar las redes de baja presión a consumidores, tanto domésticos como industriales y comerciales
- Redes de media presión Tipo A, (MPA), para presiones entre 0,05 y 0,4 bars. Para suministro de polígonos y pequeñas áreas urbanas.
- Redes de baja presión (BP), para presiones iguales o inferiores a 0,05 bars.

### **Recipientes pequeños a presión**

Dada la especificidad de cada gas y los múltiples usos que de él se hacen, no siempre es necesario transportarlo en grandes cantidades mediante enormes cisternas transportadas

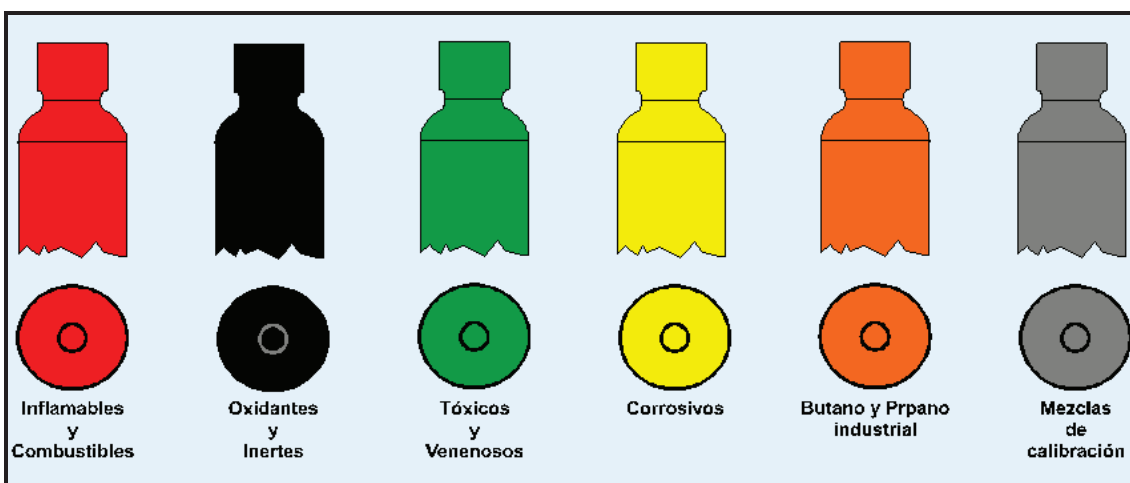
por vehículos terrestres o marítimos. Existen gran cantidad de gases que requieren envases más pequeños para su uso en industrias, laboratorios, talleres, etc.

Los envases destinados a contener este tipo de gases, son metálicos (acero, acero inoxidable, cobre, aluminio, etc.) aunque para pequeñas cantidades, y en casos especiales, también los hay fabricados en vidrio de gruesas paredes.

Los más comunes son los metálicos y se conocen con el nombre de *botellas* y/o *botellones*. Los primeros recipientes tienen una capacidad de entre los 1 y 150 litros y los segundos de entre 150 y 1000 litros de capacidad hidráulica.

En lo que a continente y peligrosidad se refiere, son los colores en el cuerpo de la botella los que dan la clave del producto. Un solo color indica el grupo de gas al que pertenece atendiendo a la siguiente clasificación:

El Esquema A V.10 muestra los colores del cuello de las botellas identificativos del producto que transportan.



**Esquema A V.10.** Colores del cuello de las botellas identificativos del producto que transportan.



En el caso de que haya varios gases, el código de colores se complica, apareciendo en la ojiva de la botella uno o más colores.

## **Riesgos de los gases**

### **Riesgos de los gases en recipientes cerrados**

Todos los gases, presurizados, licuados o criogénicos, presentan unos riesgos determinados que siguen las leyes físicas de los gases, destacando que los gases se expanden cuando se calientan produciendo un aumento de la presión en el interior del recipiente que puede dar lugar a la apertura de las válvulas de seguridad con la consecuente fuga del gas y/o incluso la rotura del envase.

En el caso de los gases licuados, incluidos los criogénicos, el comportamiento es bastante más complicado, puesto que el resultado final de un calentamiento es el resultado neto de la combinación de tres efectos. Primero, la fase gaseosa está sujeta a los mismos principios físicos de los gases. En segundo lugar, el líquido, cuando se calienta tiende a dilatarse comprimiendo más la fase gaseosa. Y finalmente, la presión de Vapor del líquido aumenta con la temperatura, dando como resultado un aumento de la cantidad en fase gaseosa. La combinación de los tres elementos, lleva a que con menor diferencia de temperatura, se consiga un aumento bastante superior de la presión interior del envase.

Puede llegar a darse el caso de un aumento de presión mucho más grave si la dilatación de la fase líquida hace que el recipiente quede totalmente lleno de líquido, (condensación de la fase gaseosa); si esto sucede, cualquier pequeña cantidad de calor adicional producirá un aumento enorme de la presión. Por ello, es de suma importancia no introducir mayor cantidad de gas en fase líquida de la que pueda contener el recipiente, dejando así una cámara suficientemente grande de fase gas para que cuando alcance el



recipiente la temperatura ambiente no quede sobrepresurizado (tómese como referencia el accidente en el camping de "Los Alfaques" en el año 1.978).

### **Roturas de recipientes - BLEVE**

Las siglas "BLEVE" vienen de la definición americana "Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion" cuya traducción corresponde a "Explosión por la Expansión de los Vapores de un Líquido en Ebullición".

Para que dicho fenómeno ocurra, se precisa de un líquido confinado en un recipiente que sea capaz de emitir vapores al calentarse. Será el caso de todos los gases licuados, independientemente de que sean inflamables o no, los cuales en su almacenamiento dentro de un tanque cerrado, siempre están a una temperatura superior a la de su punto de ebullición, y a una presión superior a su presión de vapor a temperatura ambiente.

Si por cualquier razón, se produce una bajada de presión de la fase gaseosa, el líquido empezará a evaporar gas para así conseguir su equilibrio. De igual manera, si se calienta la fase líquida, aumentará la presión de vapor del líquido.

Dada la gran importancia del término, vale más que sea considerado con mayor detenimiento en un capítulo aparte.

### **Riesgos de los gases fuera de los recipientes**

Los riesgos que presentan los gases fuera de los recipientes varían según sus propiedades químicas y físicas y la naturaleza del medio ambiente en el que se escapan.



Todos los gases, con la excepción del oxígeno y del aire, presentan un cierto riesgo para las personas al desplazar el aire necesario para la respiración. Los gases inertes, incoloros e inodoros como el nitrógeno, el helio, el argón y otros son especialmente peligrosos, ya que su presencia no se advierte. La concentración mínima de oxígeno en el aire para la supervivencia humana oscila entre 6 y 10% (la normal es de 21%) en volumen pero incluso a concentraciones mas altas la coordinación muscular y los sentidos resultan afectados.

### **Gases tóxicos o venenosos**

La emisión a la atmósfera de este tipo de gases en las cercanías de una población, es motivo de preocupación por las consecuencias devastadoras que conlleva.

### **Oxígeno y otros gases oxidantes**

Aunque no son inflamables, estos gases pueden hacer que otras materias entren en ignición a temperaturas más bajas; aceleran la combustión o hacen que se inicie un incendio al facilitar la propagación de llamas ya existentes (aparatos que quemem combustibles mas allá de las cámaras de combustión, etc.).

### **Gases licuados**

Estos gases presentan un riesgo si se escapan en forma de líquido, debido a sus bajas temperaturas. El contacto con estos líquidos fríos puede causar congelaciones, que pueden ser muy graves si la exposición es prolongada.



Las propiedades de muchos materiales de construcción y estructurales, particularmente los plásticos y el acero al carbono, se ven afectadas por las bajas temperaturas; generalmente se hacen quebradizos, lo que puede dar por resultado un fallo estructural.

## Gases criogénicos

El primer riesgo de un gas en estado criogénico es el propio al gas el cual posee en su estado las siguientes características peligrosas resultantes de sus extremadas bajas temperaturas:

- Alta relación de expansión de vapor.
- Capacidad para licuar otros gases.
- Efecto de sobreoxigenación.
- Peligro para la salud. Quemaduras y suboxigenación.

**Relación expansión de líquidos a vapor:** su principal característica es la relación de líquido a vapor que presentan estos gases (muchos de estos líquidos se evaporan en relaciones de 700 unidades de vapor por unidad de líquido): una cisterna criogénica puede almacenar 12 veces mas que una cisterna a presión que, siendo del mismo volumen, contenga solo gas. Esta aceptación para el mundo del transporte se convierte en un problema por el hecho de que un pequeño derrame puede generar grandes cantidades de gas.

**Capacidad para licuar otros gases:** los fluidos criogénicos son tan fríos, que son capaces de licuar otros gases. Esto causa diversos problemas: El nitrógeno líquido, por ejemplo, puede solidificar el vapor de agua existente en el aire (humedad) en el interior de las tuberías, respiradores o válvulas de sobrepresión, que podría causar un gran aumento de la presión interior. En caso de derrame, algunos criogénicos podrían licuar el oxígeno del aire, circunstancia especialmente peligrosa si se produce en recintos cerrados.



**Peligros para la salud:** los fluidos criogénicos presentan un gran peligro para la salud. Si un líquido criogénico entra en contacto con la piel, causa la solidificación de la dermis, reacción similar al congelamiento, aunque mucho mas grave, y es mas dolorosa que cualquier quemada. El intenso frío también disminuye la correcta circulación de la sangre en la zona afectada.

Los gases producidos por líquidos criogénicos son extremadamente fríos. En un derrame una breve exposición a los gases producidos por el líquido criogénico, pueden afectar a los ojos y los pulmones. Para protegerse de este peligro, las unidades de intervención deberán usar equipos de respiración autónoma (EPR).

### **Gases inflamables**

Dada su abundancia en el mundo industrial y también cotidiano, el estudio y conocimiento del comportamiento de los gases inflamables es del máximo interés. Básicamente presentan dos clases de riesgos fundamentales: explosiones por combustión e incendios. La confusión en la diferenciación entre estos dos fenómenos puede dar por resultado una mala aplicación de las medidas protectoras o preventivas.

**Explosiones por combustión:** se producen en las siguientes etapas:

- 1.** El gas inflamable o la fase líquida de un gas inflamable licuado se escapa de su recipiente, de una tubería o de una pieza de maquinaria (este escape también puede deberse al normal funcionamiento de un dispositivo de alivio de excesos de presión). Al escapar el líquido se evapora rápidamente y se producen las grandes cantidades de vapor características de la transición de líquido a vapor.
- 2.** El vapor-gas se mezcla con el aire.



3. En ciertas proporciones de gas y aire (los márgenes de inflamabilidad o combustibilidad) la mezcla es inflamable y podrá arder.
4. La mezcla inflamable, una vez que ha entrado en ignición, arde rápidamente y produce grandes cantidades de calor.
5. El calor producido es absorbido por todo objeto próximo a la llama o a los productos gaseosos de la combustión que están a altas temperaturas.
6. Todas las materias se dilatan cuando absorben calor. La materia que más se expande en la cercanía de una llama o de los productos gaseosos de la combustión a altas temperaturas es el aire (el aire se dilata al doble de su volumen inicial por cada 255°C de aumento de la temperatura).
7. Si el aire caliente no puede expandirse debido, por ejemplo al estar encerrado en un espacio confinado, el resultado es el aumento de la presión en el interior del mismo.
8. Si la estructura del espacio no es lo suficientemente fuerte como para resistir esta presión, algunos de sus elementos cederán de forma rápida y brusca, desplazándose de su posición original, con un ruido violento y estruendosos. Esto es lo que se llama explosión. Como el origen de la presión es una combustión, este tipo de explosión se llama explosión por combustión. También se conoce como explosión de vapor-aire.

**Incendios de gases inflamables:** Los incendios de gases inflamables pueden considerarse como una explosión por combustión abortada, en la que no se acumula suficiente cantidad de la mezcla de aire y gas inflamable porque entra en ignición prematuramente o porque no se encuentra confinada en un espacio cerrado. Como es lógico esperar, el resultado habitual de un escape de gas





inflamable al exterior es un incendio. Sin embargo, si se produjera un escape masivo, es posible que edificios circundantes, o el mismo aire, proporcionen suficiente efecto de confinamiento como para que tuviera lugar lo que se llama frecuentemente explosión al aire libre. Los gases licuados no criogénicos son capaces de producir este fenómeno así como también el hidrógeno, el etileno y algunos gases reactivos, debido a su altísima velocidad de propagación de las llamas.



**Factor de congelación  
y factor de percolación  
en la evaporación de  
líquidos inflamables derramados.**

**ANEXO  
MI**





## A VI - Factor de congelación y factor de precolación en la evaporación de líquidos inflamables derramados

### Factor de congelación $D_F$

La expresión propuesta por Fleisher para determinar el factor de congelación es la siguiente:

$$D_F = \frac{T_B}{T_B - T_S} \frac{1}{\text{erf}(\lambda)}$$

en la que  $\lambda$  se obtiene resolviendo la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{\lambda \exp(\lambda^2) - \lambda \exp(\lambda^2) \text{erfc}(\lambda)} + \frac{E_1}{\lambda \chi \exp(\lambda \chi)^2 \text{erfc}(\lambda \chi)} - E_2 = 0$$

$$\chi : \sqrt{\frac{\alpha_c}{\alpha_{nc}}}$$

$$E_1 : \frac{T_S (\rho c)_{nc}}{T_B (\rho c)_c}$$



$\alpha$ : difusividad térmica del fluido (subíndices c y nc  $\rightarrow$  "congelado" y "no congelado")

$$E_2 : \frac{F \sqrt{\rho}}{c_c T_B}$$

$\rho$ : densidad

$c$ : calor específico

$F$ : calor latente de congelación del agua

### Factor de percolación $p$

La expresión propuesta por Fleisher para determinar el factor de percolación es la siguiente:

$$p = \exp\left(\frac{K^2}{4\alpha}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{K}{2\sqrt{\alpha}}\right)$$

en la que  $K$  se obtiene resolviendo la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{C_1}{\eta^2} - C_2\right) \eta \exp(\eta^2) (1 - \operatorname{erf}(\eta)) - 1 = 0$$

donde:

$$\eta : \frac{K}{2\sqrt{\alpha_D}}$$

$$C_1 : \frac{\sqrt{\pi} \rho_M \Delta H_V K' \gamma_L}{2(\rho c)_D (T_S - T_B) \mu_M \alpha_D}$$

$$C_2 : \frac{\sqrt{\rho} \rho_L \Delta H_V \varepsilon}{(\rho c)_D (T_S - T_B)}$$



- $K'$ : constante de Darcy modificada
- $\gamma_L$ : tensión superficial del líquido
- $\mu_L$ : viscosidad dinámica del líquido
- $\varepsilon$ : porosidad
- $\rho_L$ : densidad del líquido
- $\rho_M$  densidad del suelo mojado

los subíndices M y D corresponden a "mojado", y a "seco".





**Líquidos inflamables.  
Variación de la peligrosidad  
con la temperatura y la presión.**

ANEXO  
VII



## **A VII - Líquidos inflamables. Variación de la peligrosidad con la temperatura y presión**

En la aplicación práctica de los límites de inflamabilidad de los líquidos inflamables debe tenerse en cuenta la temperatura y la presión a que están sometidos. Se puede demostrar que estos factores tienen un efecto pronunciado sobre el riesgo de incendio y explosión. Su consideración es tan importante para una manipulación segura de líquidos como los mismos límites de inflamabilidad. Un líquido que tenga un punto de inflamación superior a la temperatura ambiental no emitirá vapores capaces de ser inflamados, salvo cuando la temperatura ambiente sobrepase el punto de inflamación.

El índice de evaporación de un líquido, cuando los vapores que se encuentran sobre el mismo son los del propio líquido, se reduce al aumentar la presión que se opone a la vaporización, y aumenta al descender esta presión. Del mismo modo, a mayor temperatura, el líquido tendrá una mayor presión de vapor y tenderá a evaporarse en mayores cantidades. Cuando, bajo una temperatura y presión dadas, un líquido ha producido la mayor cantidad posible de vapores alcanza el punto de equilibrio a menos que se modifiquen las condiciones en que se encuentra. Es evidente que no puede existir equilibrio más que en un sistema cerrado, pues al aire libre el líquido vaporizable continuará evaporizándose hasta su total agotamiento. El efecto de presión y temperatura, por lo tanto, solamente es aplicable a depósitos, tuberías y aparatos de

proceso industrial, en los que el líquido y la mezcla de vapor y aire están próximos al equilibrio.

Por ejemplo, al introducir un líquido en un recipiente a presión con aire, a una temperatura tal que la mezcla vapor-aire resultante estuviera por encima del límite máximo de inflamabilidad, deberá pasar cierto tiempo (ver Figura VII.1) antes de que se produzca la suficiente evaporación para alcanzar el punto de equilibrio; mientras tanto, esta mezcla puede ser inflamable o explosiva.

Debe tenerse en cuenta que las presiones que se crean o la violencia de la explosión que puede producirse varía según la presión inicial de la mezcla vapor-aire. Con presiones iniciales altas, las presiones desarrolladas son mayores (hecho que se hace patente en el motor de gasolina por ejemplo). Con presiones iniciales bajas, son relativamente inferiores.

La temperatura afecta a los límites inferiores de inflamabilidad de vapores de disolventes. Este hecho tiene importancia en instalaciones como hornos industriales, en los que el factor importante no es la presión sino la temperatura. En estos hornos se emplea la ventilación mecánica o forzada para diluir la concentración de los vapores por debajo de su límite inferior de inflamabilidad en el aire, y para extraerlos de los hornos.

Los efectos de la temperatura sobre el LII para diferentes disolventes, se muestran en la tabla VII.1, la variación del LII en función de la temperatura y la presión se muestran en la Figura VII.1

Disolvente	Límite inferior de inflamabilidad en porcentaje de vapor en volumen a diferentes temperaturas en °C					
	Ambiente	100	200	225	250	300
Acetona	2,67	2,40	2	--	--	--
Alcohol butílico	--	1,56	1,27	1,22	--	--
Alcohol etílico	3,48	3,01	2,64	--	2,47	2,29
Alcohol metílico	6,70	5,80	4,81	--	4,62	4,44
Benceno	1,32	1,10	0,93	--	--	0,80
Ciclohexano	1,12	1,01	0,83	--	--	--
Ciclohexanona	--	1,11	0,96	0,91	--	--
Gasolina	1,07	0,94	0,77	--	--	--
Hexano	1,08	0,90	0,72	--	--	--
Nafta de petróleo	0,92	0,76	0,67	--	--	--
Tolueno	1,17	0,99	0,82	--	--	0,72
Trementina	--	0,69	0,54	--	--	--

Tabla VII.1. Efecto de la temperatura sobre el límite inferior de inflamabilidad de diferentes disolventes usados en hornos industriales.

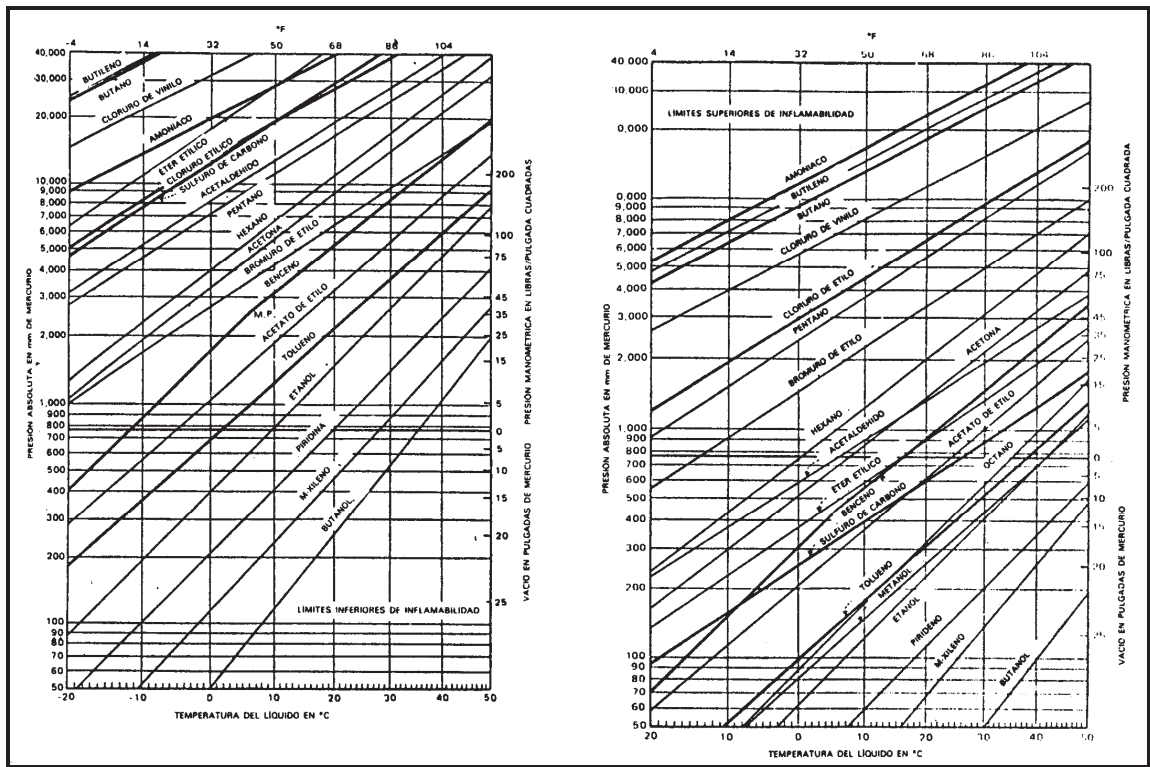


Figura VII.1. Variación del Límite Inferior de Inflamabilidad según la temperatura y la presión de diferentes líquidos y gases inflamables en equilibrio en el interior de un recipiente cerrado.



**Equipos de protección personal.**

ANEXO  
VIII







## A VIII - Equipos de protección personal

Cuando una sustancia química, que normalmente no está presente en el organismo humano penetra en él, existe el riesgo de que sus funciones resulten perturbadas, de que se produzcan lesiones (reversibles y/o irreversibles) e incluso de que muera el individuo afectado.

La intensidad de tales efectos depende en gran medida de los siguientes factores:

- tiempo de exposición
- nivel de concentración de la sustancia en el cuerpo
- propiedades químicas de la propia sustancia
- tipo de funciones que hayan resultado afectadas

Las vías por las cuales los productos químicos penetran en el organismo son básicamente tres:

- respiratoria
- cutánea
- ingestión

y las lesiones que pueden producir al organismo son muy distintas. Los productos químicos reactivos provocan resultados no deseables en el organismo (reacciones alérgicas, efectos genéticos, tumores, etc.); los ácidos y las bases irritan la mucosa nasal, los ojos y las vías respiratorias a causa de su solubilidad en agua; los agentes oxidantes y reductores descomponen los tejidos del organismo al contacto con ellos; los agentes tóxicos provocan intoxicaciones (agudas o crónicas) que producen daños serios al organismo.

Otro aspecto importante a tener en cuenta, además de la agresividad de la sustancia química como tal, es la que produce su estado físico (por ejemplo los gases criogénicos), factor que determina que la protección deba ser también adecuada cuándo se trabaje a temperaturas extremas, tanto de frío como de calor.

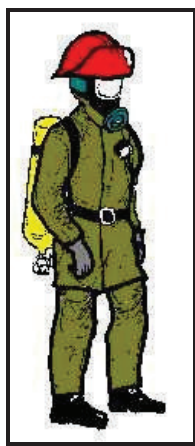
Por todo lo considerado, las intervenciones en siniestros en los que estén implicados Productos Peligrosos, deben realizarse con la **protección adecuada** para evitar riesgos a la salud.

La función básica de un **Equipo de Protección Personal**, es la de establecer una barrera entre el usuario del equipo y el producto agresivo; la elección de la protección vendrá determinada por factores como la peligrosidad del propio producto, el tiempo de exposición, el nivel de contacto, etc.

Las intervenciones en accidentes en las que se ven involucrados Productos Peligrosos no siempre presentan el mismo grado de riesgo, por lo que la protección de quienes intervienen no debe ser necesariamente siempre la misma. Los niveles de peligro dependen de muchos factores, y por lo tanto, el nivel de la respuesta debe de tenerlos en cuenta.

## Nivel de protección I

El Nivel I comprende el traje de intervención completo, es decir chaquetón, pantalón, casco, botas, guantes y verdugo y además el E.R.A.



La protección básica en una intervención de este tipo la proporciona el E.R.A. (equipo de respiración autónoma), que protege las vías respiratorias evitando la intoxicación por inhalación e ingestión del producto. Ello, unido a la protección que proporciona el traje de intervención, hace que en la mayoría de siniestros el Nivel I sea seguro para una primera intervención rápida, siempre y cuándo no se produzca un contacto directo con el producto ni una exposición muy intensa a tóxicos que puedan afectar zonas de la piel no protegidas.

En muchos Servicios de Intervención, el vehículo de primera salida no dispone de trajes de protección química, por lo que en un accidente en el que se ven involucradas Materias Peligrosas, se debe realizar la primera intervención en espera de que lleguen refuerzos con los equipos adecuados. En este caso y valorando siempre la situación (producto y condiciones del accidente), el mando de la salida debe decidir la intervención con Nivel I de protección para los siguientes casos:



- Salvar vidas sin exponerse directamente al producto.
- Tratar de identificar el producto y sus peligros.
- Asegurar la zona por medio de balizamiento y evacuación.

## **Nivel de protección II**

El Nivel de protección II está compuesto por el traje contra salpicaduras que va colocado encima del equipo del Nivel I. Esta protección no es estanca a gases ni cuenta con presión positiva por lo que no debe utilizarse en concentraciones altas de gases tóxicos.

El Nivel II es necesario para trabajar con líquidos inflamables y corrosivos ya que, si se utilizase únicamente el traje de intervención este podría llegar a absorber el producto empapándose del mismo, provocando graves daños en caso de inflamación. El traje de salpicaduras hace que el producto resbale y no empape el de intervención; se fundiría en caso de inflamación pero todavía quedaría la protección del traje de intervención.

El Nivel II es utilizado también para realizar las tareas de descontaminación de personal con Nivel III.

Existen en el mercado gran variedad de este tipo de trajes y es conveniente que los vehículos de primera salida cuenten con trajes de este tipo.

## **Nivel de protección III**

Los equipos de Nivel III son los conocidos como "*Trajes Antigás*". Su principal característica es la estanqueidad, lo que permite trabajar a los miembros del equipo de intervención en ambientes tóxicos.

La elección del tipo de traje de Nivel III, no es tarea fácil para el mando, ya que no existe el traje perfecto. El operario del equipo de intervención, a diferencia de los trabajadores de empresas químicas, desconoce el producto al que se va a enfrentar, por lo que debe contar con un traje lo más polivalente posible.

Para realizar trabajos en condiciones especiales, estos trajes deben utilizarse con accesorios que permitan actuar con seguridad, así se tiene:

- Protección para temperaturas bajas: para criogénicos y otros gases licuados en los que las bajas temperaturas (< de  $-40^{\circ}$ ) hagan aparición en caso de fuga, la resistencia del traje puede verse afectada gravemente, por lo que será preciso utilizar protección suplementaria consistente en guantes de protección para frío, traje de protección de chaqueta y pantalón y protección para botas.
- Protección para fuego: esta protección se consigue mediante trajes de aproximación y penetración al fuego.
- Evidentemente todas estas protecciones suplementarias dificultan la visión y hacen más fatigosos los trabajos.





**Espumas.**

ANEXO







## A IX - Espumas

### Teoría del fuego

El fuego es una reacción química de combustión u oxidación entre los vapores desprendidos por una sustancia y el oxígeno del aire, acompañada de desprendimiento de luz y calor.

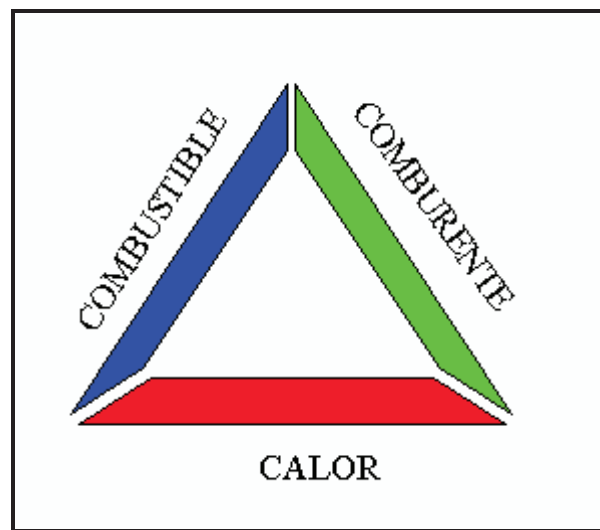
Se origina por la incidencia de una fuente de calor que entra en contacto con el combustible e inicia la emanación de los gases, los cuales se inflaman al alcanzarse la temperatura de sus puntos de inflamación. Con esta inflamación se origina un aporte de calorías al ambiente que se adiciona al calor ya existente y procedente de la primera fuente calorífica. Esta nueva y más alta temperatura incidirá sobre el combustible, lo cual hará prosperar el desprendimiento de una mayor cantidad de gases procedentes de las zonas más interiores y profundas del combustible. Con esta más alta temperatura, se quemarán otros tipos de gases que no hubieran aparecido con las temperaturas iniciales mucho más bajas, las cuales también se inflamarán a su debido momento.

Todo este proceso cíclico se realiza de una forma muy rápida y progresiva, siendo éste el momento en el cual se puede definir que el incendio se ha iniciado.

Se denomina incendio al fuego cuando ha superado la etapa inicial y alcanza un desarrollo considerable, sin control en el tiempo y en el espacio.

El incendio se caracteriza por la emisión de calor acompañada de humo, llamas o de ambos. Desde el punto de vista cinético, la velocidad de oxidación, en el fuego es rápida. Si la oxidación es lenta, se trata de una oxidación como el hierro. Si es muy rápida, se trata de una deflagración, como la pólvora, y si es prácticamente instantánea se habla entonces de una detonación.

Para que se dé la reacción química de combustión, es preciso que se encuentren presentes tres elementos: oxígeno (comburente), calor y combustible. De aquí que tradicionalmente se haya representado gráficamente por un triángulo, en el que cada uno de sus lados o vértices corresponde a cada uno de estos elementos, dando pie a lo que se llama **triángulo del fuego** (Esquema A IX.1).

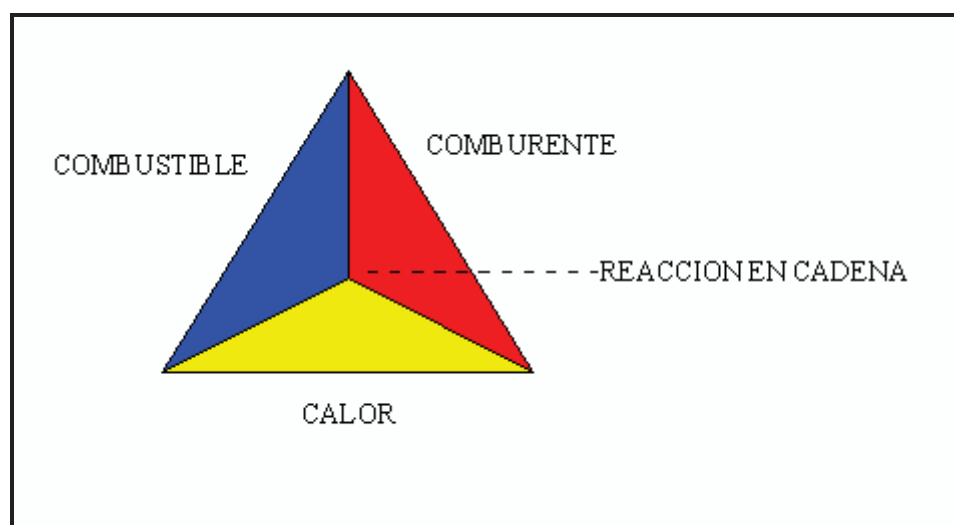


**Esquema A IX.1.** Triángulo de fuego.

Tras la observación de que dentro de la llama, e incluso en su propia extinción, se dan fenómenos de reacción en cadena, se concluyó que este símil no se explicaba suficientemente el fenómeno del fuego. Por tal motivo actualmente se habla de un **tetraedro** de fuego con los siguientes puntos:

Oxígeno - Calor - Comburente - Reacción en cadena

El Esquema A IX.2 muestra un tetraedro de fuego.



**Esquema A IX.2.** Tetrahedro de fuego.

### **Mecanismos de extinción**

No todos los fuegos son iguales, van a depender del tipo de combustible que arde para que se comporten de una forma u otra. Los fuegos de gasolina producen solamente llamas mientras que los de madera además originan brasas incandescentes.

Con el fin de facilitar la labor de elección del agente extintor adecuado respecto al fuego que se pretende apagar, es importante hacer una clasificación agrupándolos respecto al combustible que da origen a aquel.

En base a la norma UNE-EN 2:1.994 los fuegos se clasifican en:

**Clase A** Son los de materias sólidas (madera, papel, etc.) cuya combustión tiene lugar normalmente con formación de brasas.

**Clase B** Son los de materias líquidas o que se licúan con el calor: gasolinas, alcoholes, grasas, pinturas, etc.

**Clase C** Son los de gases combustibles (butano, gas ciudad, etc.)

**Clase D** Son los de metales de características especiales: magnesio, aluminio, etc.

Los procedimientos de extinción fundamentales se basan en la teoría de la eliminación de uno de los factores que producen el fuego. Los procedimientos de extinción básicos se basan en teoría en la eliminación de uno de los factores que producen el fuego:

**Eliminación del combustible (desalimentación):** si se retiran los materiales combustibles de las cercanías del fuego, el incendio se extinguirá por sí solo. El Esquema A IX.3 muestra el triángulo de fuego en el que "no" hay combustible.



**Esquema A IX.3.** Triángulo de fuego en el que "no" hay combustible.

**Refrigeración:** parte del calor desprendido por el incendio se disipa en el ambiente, y parte de él inflama nuevos combustibles, propagando el incendio. Si

se vierten o derraman sobre el fuego sustancias capaces de absorber el calor, se reduce el incendio. El Esquema A IX.4 muestra el triángulo de fuego en el que "no" hay energía de activación.



**Esquema A IX.4.** Triángulo de fuego en el que "no" hay energía de activación.

**Sofocación:** se consigue arrojando una sustancia incombustible capaz de formar una capa o manta sobre los materiales en combustión, impidiendo el contacto con el aire, o arrojando un gas inerte que desplace el oxígeno u otro comburente por debajo del mínimo necesario para la combustión. El Esquema A IX.5 muestra el triángulo de fuego en el que "no" hay comburente.



**Esquema A IX.5.** Triángulo de fuego en el que "no" hay comburente.

Exceptuando la desalimentación, el resto de técnicas exigen la utilización de los agentes extintores.

El cuadro A IX.1 muestra los agentes extintores utilizados para apagar diferentes tipos de fuego.

AGENTE EXTINTOR		AGUA		Espuma	POLVO			CO <sub>2</sub>	Halón
		Pulverizad	Chorro		Convenc	Polivalente	Especial		
CLASES DE FUEGO	A	✓✓✓	✓✓	✓✓		✓✓		✓	✓
	B	✓		✓✓	✓✓✓	✓✓		✓✓	✓✓
	C				✓✓	✓✓			✓
	D						✓		
FORMAS DE EXTINCIÓN	1º	Enfría	Enfría	Sofoca	Inhibe	Inhibe	Sofoca	Sofoca	Inhibe
	2º	Sofoca	Corte combust	Enfría	Sofoca	Sofoca	Enfría	Enfría	Sofoca

Cuadro A IX.1. Agentes extintores para los diferentes tipos de fuego

Para los fuegos de clase B, el agua en su forma física (chorro, ...) resulta inadecuada, pues para la extinción de las llamas es necesario cubrirlas enteramente, ahogándolas para impedir el contacto con el aire, que les sirve de alimentación.

Uno de los métodos más efectivos para hacerlo es el empleo de espuma física, ya que es más fácil de manejar que la espuma química, más segura bajo condiciones atmosféricas adversas, requiere menos espacio de almacenaje y tiene un campo de utilidad práctica mucho más amplio.

La espuma física es una mezcla mecánica del líquido espumógeno, agua y aire en estado turbulento y a una presión que oscila entre 5 y 7 kg/cm<sup>2</sup>. Se obtiene a través de un *proporcionador* que se instala entre dos tramos de manguera; el agua pasa a través del

proporcionador y por efecto Venturi succiona por un conducto de aspiración el líquido espumógeno, para seguir por la manguera hacia la lanza de salida, donde se le suministra la debida cantidad de aire para formar la espuma expandida.

Se denomina *índice de expansión* de la espuma a la capacidad de aumentar su volumen por una mayor aportación de aire, y en base a esta propiedad, se clasifican en tres grupos:

**Baja expansión:** mezcla de agua y espumógeno con una pequeña aportación de aire. De 1 litro de mezcla de agua-espumógeno se obtienen 10 litros de espuma expandida.

**Media expansión:** mezcla de agua y espumógeno con una elevada aportación de aire. De 1 litro de mezcla de agua-espumógeno se obtienen 100 litros de espuma expandida.

**Alta expansión:** mezcla de agua y espumógeno con una gran aportación de aire. De 1 litro de mezcla de agua-espumógeno se obtienen 1000 litros de espuma expandida.

y en base a sus ingredientes de fabricación, se distinguen 6 grupos:

**Espumas proteínicas (P):** obtenidas por hidrólisis de proteínas, animales y vegetales, mezclados con sales y líquidos poliméricos que garantizan su estabilidad.

En general son muy estables, tienen baja tendencia a fluir y buena estabilidad térmica. Producen espumas densas y viscosas de alta estabilidad, se contaminan rápidamente con el combustible ardiente no teniendo capacidad de sellado.

**Espumas fluoroproteínicas (FP):** obtenidas con los mismos componentes que las anteriores a las que además, se les han añadido sulfatantes fluorados activos, que les confieren la propiedad de no adherirse al combustible, lo que las hace especialmente indicadas para ser aplicadas por el método de inyección. Tienen un gran poder de sellado (evita las reigniciones) y son muy estables al calor, permitiendo su proyección sobre las llamas.

Tanto las espumas proteínicas como las fluoroproteínicas se utilizan generalmente en baja expansión, debido a la gran proyección que se obtiene.

**Espumas sintéticas (S):** obtenidas a partir de detergentes sintéticos formadores de espuma a los que se les han añadido estabilizantes.

Cuando se emplean equipos generadores de espuma convencionales, el resultado es una espuma física de baja viscosidad y cualidades de diseminación rápida sobre las superficies líquidas.

Sus características extintoras dependen del volumen de la capa de espuma sobre la superficie ardiente (detiene el paso de aire y evita la emanación de vapores combustibles). Son menos estables que las anteriores: su contenido en agua se pierde rápidamente, dejando una masa de burbujas que es muy vulnerable a la disolución térmica o mecánica.

**Espumas fluorosintéticas (formadoras de películas):** elaboradas a partir de hidrocarburos fluorados de cadena larga, con propiedades tensoactivas especiales, a los cuales se les han añadido polímeros hidrosolubles para reforzar las paredes de las burbujas y así retardar su disolución.



Los agentes espumógenos formadores de película se componen de materiales sintéticos que forman espumas similares a las proteínicas, conocidas como AFFFs. Las burbujas de aire generadas poseen una baja viscosidad, rápida extensión y actúan como barreras superficiales para impedir el contacto del combustible con el aire y detener su elaboración.

El resultado de la doble acción de los agentes espumógenos formadores de película es la producción de una espuma de alto poder de extinción. En términos de la cantidad de agua y de concentrados necesario y de la rapidez con que actúa contra los derrames de líquidos combustibles, el AFFFs puede emplearse en forma de capa protectora de espuma sobre la superficie del líquido combustible no inflamado como medida de prevención.

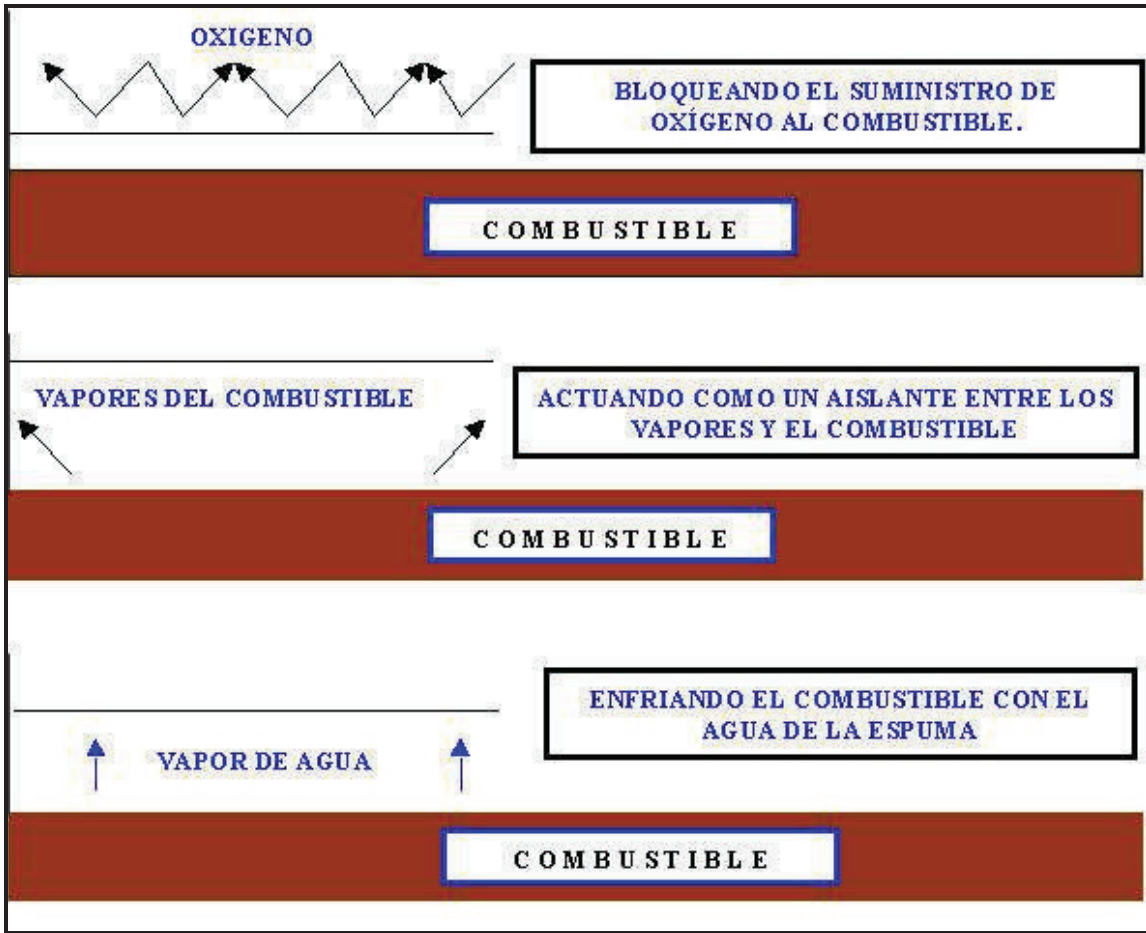
**Espumas antialcohol (AR):** las espumas generadas por los agentes ordinarios están expuestas a la disolución rápida y pérdida de efectividad cuando se emplea en fuegos de líquidos combustibles hidrosolubles o del tipo de solvente polar, como los alcoholes, disolventes, lacas, aminas, etc.

Para ello se han desarrollado ciertos agentes espumógenos especiales llamados antialcohol. Por su fabricación existen tres familias:

- Concentrados a base de proteínas que contienen *pasta* de metales hechos solubles gracias a soluciones disolventes amoniacaes.
- Formadas por dos componentes concentrados, uno a base de un polímero y otro a base de un catalizador que vuelve a polimerizarse para conferir a la espuma así formada una gran estabilidad frente a los solventes polares.
- Cualquier tipo de espuma puede ser utilizado con agua salada.

**Espuma Hazmat:** evita la formación de vapores y tiene buena resistencia a los productos químicos. Es apropiada para los productos alcalinos.

El Esquema A IX. 5 muestra el proceso de apagado de un combustible inflamado mediante espuma.



Esquema A IX.5 Apagado de un combustible inflamado mediante espuma.

### Matriz para la elección de espumas

El Esquema A IX.6 muestra una matriz para la selección de espumas que minimice o suprima la liberación de productos tóxicos o vapores inflamables.



<b>MATRIZ DE SELECCIÓN DE ESPUMAS QUE MINIMICE O SUPRIMA LA LIBERACIÓN DE PRODUCTOS TÓXICOS O VAPORES INFLAMABLES.</b>						
	<b>Surfactante baja expansión</b>	<b>Surfactante alta expansión</b>	<b>Proteína</b>	<b>Fluoro proteína</b>	<b>Alcohol</b>	<b>AFFF</b>
<b>Hidrocarburos aromáticos:</b> - Benceno - Tetrahidro naftaleno - Tolueno	C+ U C+	B+ U B+	B+ U B+	B+ ND B+	A+ ND A+	C+ U C+
<b>Hidrocarburos alicíclicos:</b> - Ciclohexano	B+	A+	B+	B+	C+	C+
<b>Líquidos orgánicos industriales:</b> - Gasolina - Queroseno - Nafta - Disolvente para pinturas	C+ C+ C+ C+	B+ B+ B+ B+	B+ B+ B+ B+	B+ B+ B+ B+	C+ A+ C+ A+	C+ C+ C+ C+
<b>Gases licuados:</b> - Gas natural licuado	C-	A+	E-	E-	E-	E-
<b>Productos inorgánicos:</b> - Tetracloruro de silicona - Tetróxido de azufre	E- E-	A+ A+	E- E-	E- E-	E- E-	E- E-
<b>Productos inorgánicos licuados:</b> - Amoníaco - Cloro	C+ C+	A+ C+	C+ C+	C+ C+	E- E-	C+ E-



<b>MATRIZ DE SELECCIÓN DE ESPUMAS QUE MINIMICE O SUPRIMA LA LIBERACIÓN DE PRODUCTOS TÓXICOS O VAPORES INFLAMABLES.</b>						
	<b>Surfactante baja expansión</b>	<b>Surfactante alta expansión</b>	<b>Proteína</b>	<b>Fluoro proteína</b>	<b>Alcohol</b>	<b>AFFF</b>
<b>Acidos orgánicos:</b>						
- Acido acético	ND	ND	ND	ND	ND	ND
- Acido Caprónico	U	ND	ND	ND	ND	ND
<b>Alcoholes:</b>						
- Amílico	U	U	ND	ND	ND	ND
- Butanol	E-	E-	E-	E-	A+	E-
- Butil Cellosolve	ND	ND	U	ND	ND	ND
- Metanol	E-	E-	E-	E-	A+	E-
- Octanol	U	U	U	U	U	ND
- Propanol	E-	E-	E-	E-	A+	E-
<b>Aldehídos y Cetonas:</b>						
- Acetona	E-	E-	E-	E-	A+	E-
- Metil butil cetona	E-	E-	U	ND	A+	ND
- Metil etil cetona	U	U	U	ND	A+	ND
<b>Esteres:</b>						
- Acetato de butilo	U	U	U	U	ND	ND
- Acetato de etilo	U	U	U	U	ND	ND
- Acrilato de metilo	U	U	ND	U	ND	ND
- Metacrilato de metilo	U	U	ND	U	ND	ND
- Acetato de propilo	U	U	U	U	ND	ND
<b>Compuestos halogenados:</b>						
- Bromuro de butilo	U	U	ND	ND	ND	ND
- Bromuro de metilo	U	U	ND	ND	ND	ND
- Tetracloroetano	U	U	ND	ND	ND	ND
<b>Hidrocarburos:</b>						
- Heptano	C+	B+	B+	B+	A+	C+
- Hexano	C+	B+	B+	B+	A+	C+
- Octano	C+	B+	B+	B+	A+	C+



<b>MATRIZ DE SELECCIÓN DE ESPUMAS QUE MINIMICE O SUPRIMA LA LIBERACIÓN DE PRODUCTOS TÓXICOS O VAPORES INFLAMABLES.</b>						
	<b>Surfactante baja expansión</b>	<b>Surfactante alta expansión</b>	<b>Proteína</b>	<b>Fluoro proteína</b>	<b>Alcohol</b>	<b>AFFF</b>
<b>Compuestos de base nitrogenada:</b>						
- Dimetil formamida	U	E-	ND	ND	ND	ND

Resultados basados en el test realizado por MSA Research Corporation en un programa subvencionado por la U. S. Environmental Protection Agency.

**A+** = Formulaci3n de espuma 3ptima.

**B+** = Formulaci3n de espuma algo menos 3ptima

**C+** = Formulaci3n de espuma aceptable en algunas situaciones

**E-** = Formulaci3n de espuma no apropiada

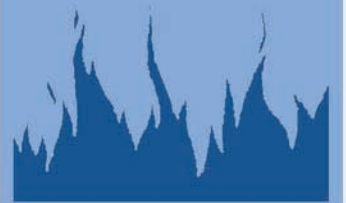
**U** = Capacidad incierta o datos limitados

**ND**= No se dispone de datos

**Esquema A IX.6** Matriz para la selecci3n de espumas que minimice o suprima la liberaci3n de productos t3xicos o vapores inflamables.



**APPO**







## 1. Introducción

Actualmente las plataformas que cuentan con una mayor base de aplicaciones útiles construidas y también en desarrollo para crear programas informáticos son las que se basan en un interfaz gráfico, tipo Windows o Mac OS.

El éxito de Windows ha hecho que este sea el entorno para el que se desarrollan más aplicaciones en la actualidad. Inicialmente el lenguaje prácticamente obligado para poder programar en Windows era C, y aún hoy es utilizado. Posteriormente apareció el compilador C++ con jerarquías de clases específicas para facilitar la programación en Windows, como Object Windows de Borland, o Foundation Classes de Microsoft.

El desarrollo de aplicaciones mediante estas herramientas, salvando las dificultades de la programación orientada a objetos, se ve simplificado en gran medida gracias a que muchos aspectos de Windows se encuentran "embebidos" en objetos. Con los primeros lenguajes de programación, crear una ventana era tarea de meses de desarrollo para un equipo de trabajo.

La programación en lenguaje orientado a objetos tiene dos ventajas muy claras:

- Genera un código más sencillo y comprensible para la "maquina".

- El código generado puede ser válido para diversas máquinas y, posiblemente, para diversos sistemas operativos.
- Utiliza un lenguaje natural, como el inglés, que lo hace fácil de usar (procedure, begin, show, for, do, print, end, ...).

Los lenguajes de programación informática más conocidos son los que a continuación se indican:

- C++
- Delphi
- Java
- PHP
- Visual FoxPro
- Visual Basic.NET

## 2. Lenguaje Delphi

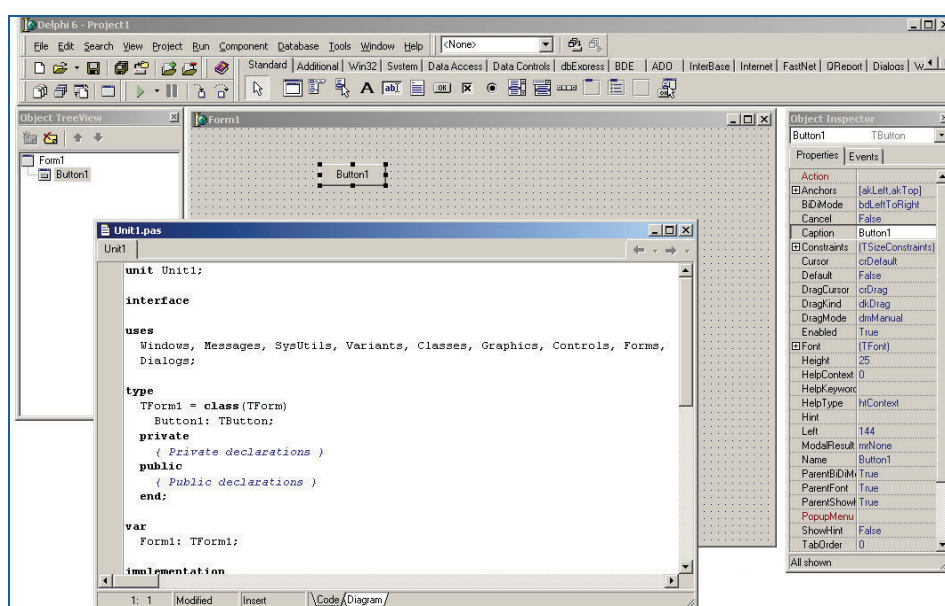
El Delphi es un lenguaje de programación de la firma *Borland* (compiladores Borland pascal y Borland C++) que se creó con el propósito de agilizar la programación visual. Representa la primera apuesta de esta empresa por un entorno de desarrollo netamente visual mediante una herramienta de programación sumamente avanzada, el Object Pascal. Su entorno es flexible y potente, contando con un gran número de componentes prefabricados. Se puede usar para casi cualquier proyecto como por ejemplo servicios del sistema operativo, comunicación entre un servidor web y un programa, aplicaciones de consola, conectividad con bases de datos, aplicaciones visuales, etc. Entre las aplicaciones más populares actualmente destaca Skype, un programa de telefonía por IP.

Este lenguaje produce aplicaciones en código máquina, por lo que la computadora las interpreta inmediatamente y no precisa de un lenguaje interprete como es el caso de otros lenguajes de programación (Visual Basic, etc.). es decir, genera código directamente ejecutable, sin necesidad de distribuir junto a la aplicación archivos adicionales de "runtime". Esto tiene varias consecuencias:

- El archivo ejecutable es más rápido al no tener que ser interpretado en tiempo de ejecución.
- El tamaño final total de la aplicación suele ser inferior.
- Cualquiera de sus versiones se puede programar DLLs.

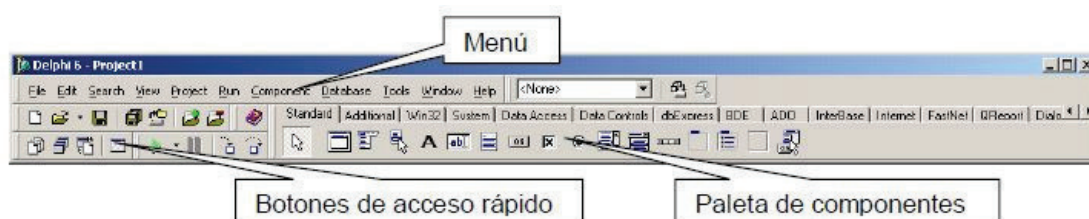
- Se pueden programar directamente los componentes visuales e incluso crear nuevos controles que hereden características de los ya existentes.
- Se pueden utilizar componentes visuales de otros lenguajes de programación.
- Permite utilizar componentes estándar de las librerías de Windows.

El Esquema APPO.1 muestra cómo es la pantalla en el lenguaje de programación Delphi.



**Esquema APPO.1.** Pantalla de programación en el lenguaje Delphi.

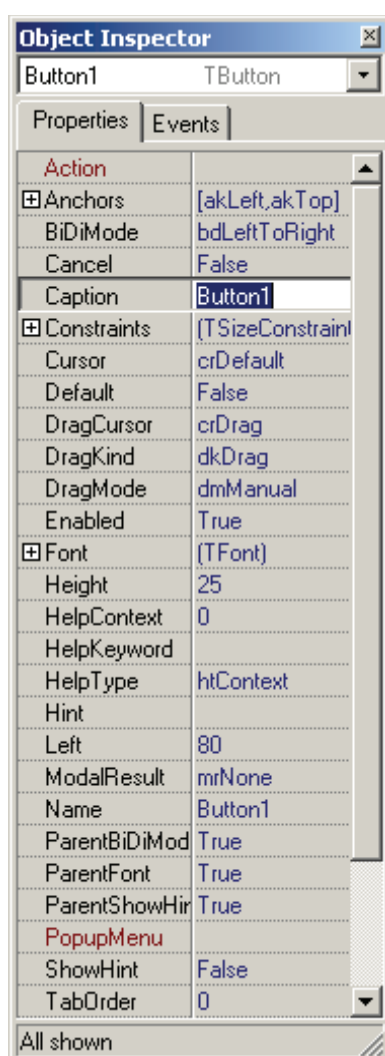
Los “utensilios” principales de Delphi se aprecian de inmediato en la parte superior de la ventana principal (véase el Esquema APPO.2). Se aprecia claramente el menú, los botones de acceso rápido y una Paleta de Componentes muy extensa.



**Esquema APPO.2.** Parte superior de la ventana principal de Delphi.

La paleta de componentes da acceso a los componentes, que pueden ser visuales (llamados controles) o no visuales, y que implementan las funciones básicas de interfaz de usuario, acceso a bases de datos, etc.

Ejemplos de controles son los botones, campos de edición, listas desplegables o paneles, mientras que los componentes de acceso a bases de datos o los temporizadores son componentes no visuales.



**Esquema APPO.3.** Inspector de Objetos.

El Esquema APPO.3 muestra el Inspector de Objetos del lenguaje de programación Delphi (normalmente a la izquierda de la pantalla principal de delphi) permite ver y modificar las propiedades de todos y cada uno de los componentes.

Cada componente de la paleta tiene unas propiedades predeterminadas que podrán ser modificadas por el programador (tipo de letra, tamaño, color, posición del componente en el formulario, visible o no visible, activado o no activado, nombre, número de decimales en el caso de ser un componente numérico, protegido o no protegido a la escritura, etc.).

Delphi permite al programador crear nuevas propiedades a un componente.

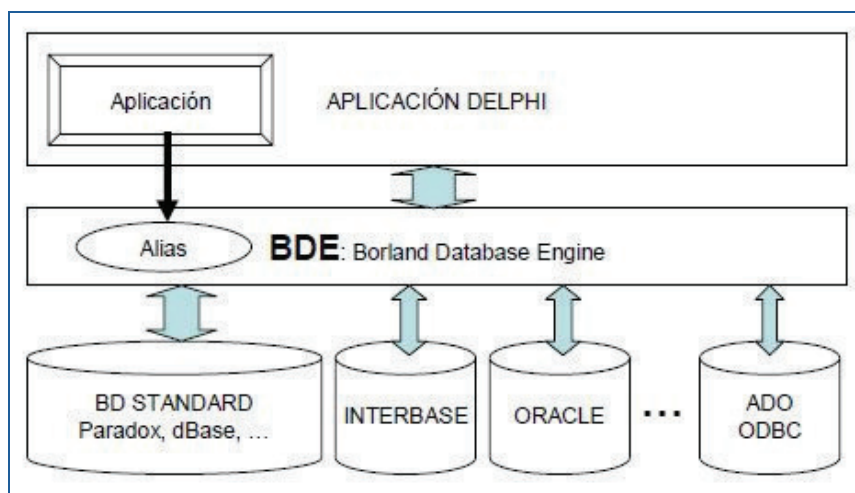
También permite asociar *event handlers* (manejadores de eventos) a los componentes.

Tiene una gran capacidad para desarrollar aplicaciones con conectividad a bases de datos de diferentes fabricantes. El programador de Delphi cuenta con una gran cantidad de componentes para realizar la conexión, manipulación, presentación y captura de los datos, algunos de ellos liberados bajo licencias de código abierto o gratuito. Estos componentes de acceso a datos pueden enlazarse a una gran variedad de controles visuales, aprovechando las características del lenguaje orientado a objetos, gracias al polimorfismo. En la paleta de componentes pueden encontrarse varias pestañas para realizar una conexión a bases de datos usando diferentes capas o motores de conexión. Los hay que permiten conectarse a bases de datos de diferentes fabricantes tales como BDE, DBExpress o ADO, que cuentan con manejadores para los formatos más extendidos. También hay componentes de conexión directa para un buen número de bases de datos específicas: Firebird, Interbase, Oracle, etc.

Las capas de conexión más habituales disponibles para las bases de datos son:

- Interbase/Firebird: IBX (InterBase eXpress), IBO (IB Objects), MDO (Mercury Data Objects), DBExpress, BDE, FibPlus, Zeos.
- Oracle: DOA (Direct Oracle Access), NCOci8.
- dBase: BDE.
- FoxPro: BDE.
- Paradox: BDE.
- Microsoft SQL Server: BDE, ADO, \*DBExpress.
- Microsoft Access: DBF.
- mySQL: Zeos (nativo), DBExpress, BDE y ADO (usando ODBC).
- Postgres: BDE, ADO, ZEOSDBO.

El Esquema APPO.4 muestra un esquema de las capas de conexión para las bases de datos descritas



**Esquema APPO.4.** Esquema de las capas de conexión para bases de datos





### 3. APPO

La herramienta informática APPO (Accidentes de Productos derivados del PetrOleo) ha sido desarrollada en el lenguaje de programación Delphi, versión 7.0 (2002) y en el sistema de administración de bases de datos relacionales Microsoft Access – 97 (1997).

Se trata de un programa de ordenador que permite realizar cálculos y tratamiento de datos en un entorno gráfico utilizando menús descriptivos y recuadros de diálogo. La mayoría de tareas pueden realizarse simplemente apuntando y marcando con el ratón y/o el teclado del ordenador. No necesita ordenadores de última generación ni sistemas operativos especiales. Es compatible a cualquier ordenador del mercado.

Se accede a él ejecutando el fichero SAPPO.EXE que se encuentra en el directorio c:\SAPPO o abriendo el icono de acceso directo APPO que se encontrará en la carpeta o directorio que el usuario tenga predeterminado.

El programa APPO consta de tres bloques o módulos bien diferenciados:

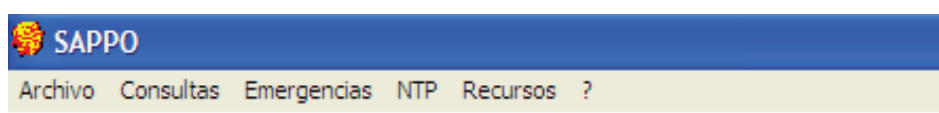
- Módulo de apoyo
- Base de datos
- Módulo de cálculos



## 4. APPO - Módulo de apoyo

El módulo de apoyo es el bloque que tiene toda la información complementaria que puede necesitar el mando para ejercer correctamente su función ante una emergencia (véase el punto 12.3 Técnicas de Mando en esta tesis).

El mando o usuarios, puede acceder a él haciendo uso de la barra de menús desplegables que se encuentra en la parte superior de la pantalla del programa APPO (Esquema APPO.5).



**Esquema A.5.** Barra de menús desplegables de la parte superior de la pantalla.

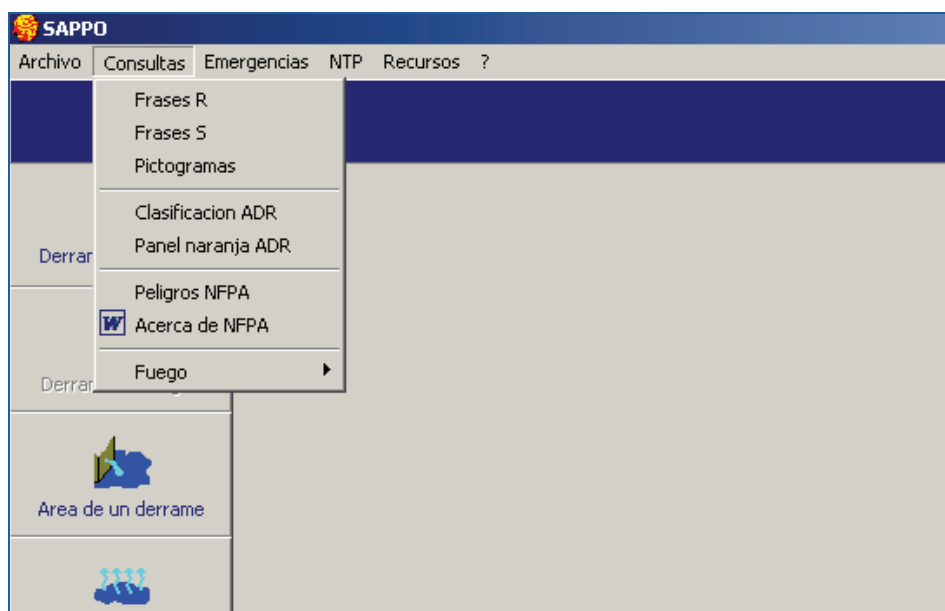
Este módulo consta de los siguientes componentes de información útil para una emergencia:

- Consultas.
- Emergencias.
- NTP (notas técnicas de prevención).
- Recursos.

## 4.1 Consultas

Es el primer punto del módulo. Contiene información relacionada con las posibles **consultas** que pueda tener el mando en una emergencia.

Se despliega en ocho apartados de información (Esquema APPO.6):

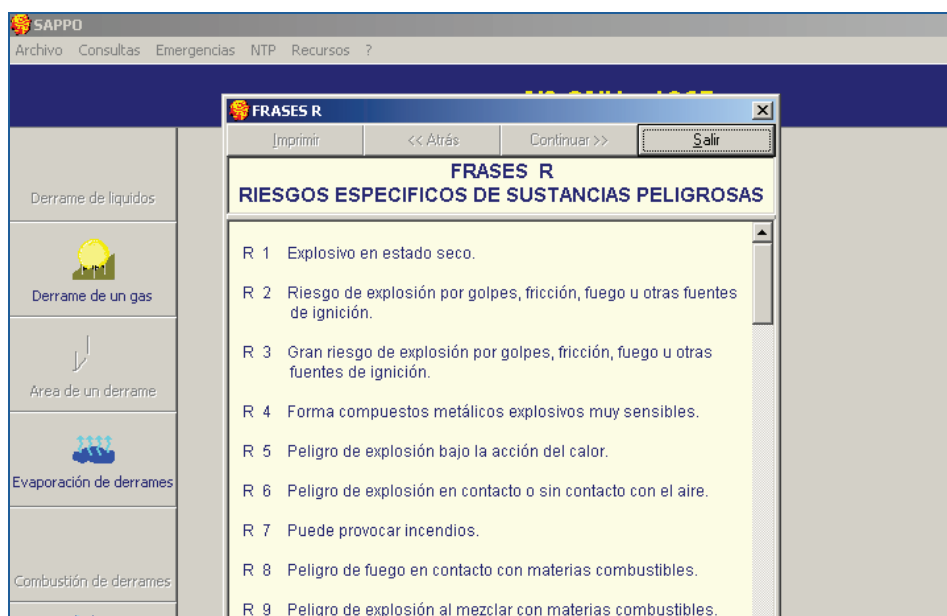


**Esquema APPO.6.** Despliegue del menú consultas

Aunque mucha de esta información se puede encontrar en manuales diversos, guías, folletos, etc. es importante en una emergencia tenerla toda centralizada en una misma aplicación que sea de fácil acceso, de fácil visualización, que no dé lugar a confusiones. El factor tiempo es muy importante y, a ser posible, no hay que invertirlo buscando información en manuales, libros, consultas telefónicas, etc.

- **Frasas R**, opción que abre una "pantalla flotante" o formulario de información bajo la modalidad *showmodal*. En él, se indican todas las frases R correspondientes a los riesgos específicos de las sustancias peligrosas. La

modalidad *showmodal* detiene la ejecución de todo el programa hasta que la pantalla activada es cerrada (véase el esquema APPO.7).



**Esquema APPO.7.** Despliegue del menú de "frases R"

- **Frases S**, abre una pantalla de información idéntica a la de las frases R, en la que se indican todas las frases S correspondientes a los consejos de prudencia de las sustancias peligrosas. Se presenta también en la modalidad *showmodal*. Una vez cerrado este formulario, el programa APPO continuará funcionando.
- **Pictogramas**, abre una pantalla de información en la misma modalidad que las anteriores, en la que se indican todos los pictogramas de peligro que se pueden encontrar en los embalajes de las mercancías peligrosas.

Su formato y color puede variar un poco dependiendo de la modalidad de transporte en que se encuentra (carretera, ferrocarril, naviera, etc.), pero el dibujo indicativo es el mismo en todos los casos. De hecho, el Reglamento (CE) 1272/2008, sobre clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas ha realizado unas modificaciones en los pictogramas de peligro. Transcurridos

cuatro años después de su entrada en vigor, todavía se ven en el mercado envases con los pictogramas antiguos (véase Esquema APPO.8).














**Esquema APPO.8.** Despliegue de pictogramas de peligro

Las unidades de transporte también llevan pictogramas de peligro y no siempre coinciden con las establecidas en el Reglamento citado, pues no es lo mismo el etiquetado que la materia peligrosa lleva en el envase que el etiquetado de la unidad de transporte de mercancías peligrosas.

A continuación se indican los dos modelos de pictograma (Esquema APPO.9):

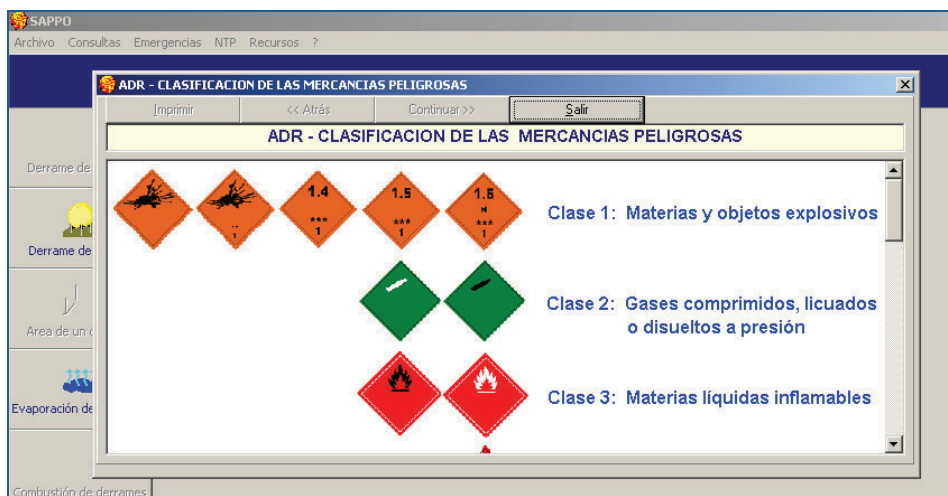
	Antiguo	Nuevo
Explosivos		

	Antiguo	Nuevo
Inflamables		
Comburentes		
Corrosivos		
Toxicidad aguda (oral, cutánea, por inhalación)		
Corrosión o irritación cutánea		
Sensibilización respiratoria o cutánea, toxicidad específica, mutagenicidad, carcinogenicidad.	-----	

	Antiguo	Nuevo
Peligros para el medio ambiente acuático		

**Esquema APPO.9.** Modelos de pictogramas de peligro

- Clasificación ADR**, abre una pantalla de información en la que se indica la clasificación de las mercancías peligrosas por clases y describe los pictogramas indicativos que puede tener cada una de las clases en los medios de transporte terrestre (véase Esquema APPO.10).



**Esquema APPO.10.** Despliegue de la clasificación de mercancías peligrosas

A una mercancía peligrosa le puede corresponder más de un pictograma de peligro. Por ejemplo el oxígeno suministrado a hospitales que se comercializa bajo la forma de gas licuado en contenedores cisterna. Se observa en las unidades de transporte los siguientes pictogramas (Esquema APPO.11):





Esquema APPO.11. Pictogramas para el oxígeno

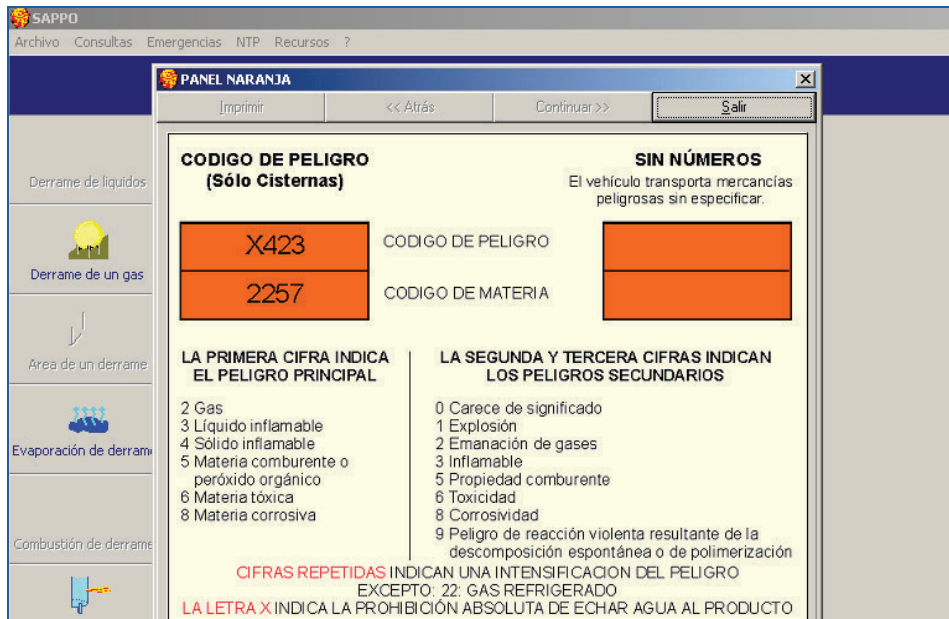
El oxígeno es un gas a presión y es un producto comburente; le corresponden dos pictogramas.

Por el contrario, otras materias peligrosas como el etanol, sólo van etiquetadas con un pictograma de peligro.



Contenedor cisterna de etanol

- **Panel Naranja**, el cual abre una pantalla informativa de lo qué es un panel naranja en una unidad de transporte por carretera y qué información aporta (véase el Esquema APPO.12 y Esquema APPO.13).

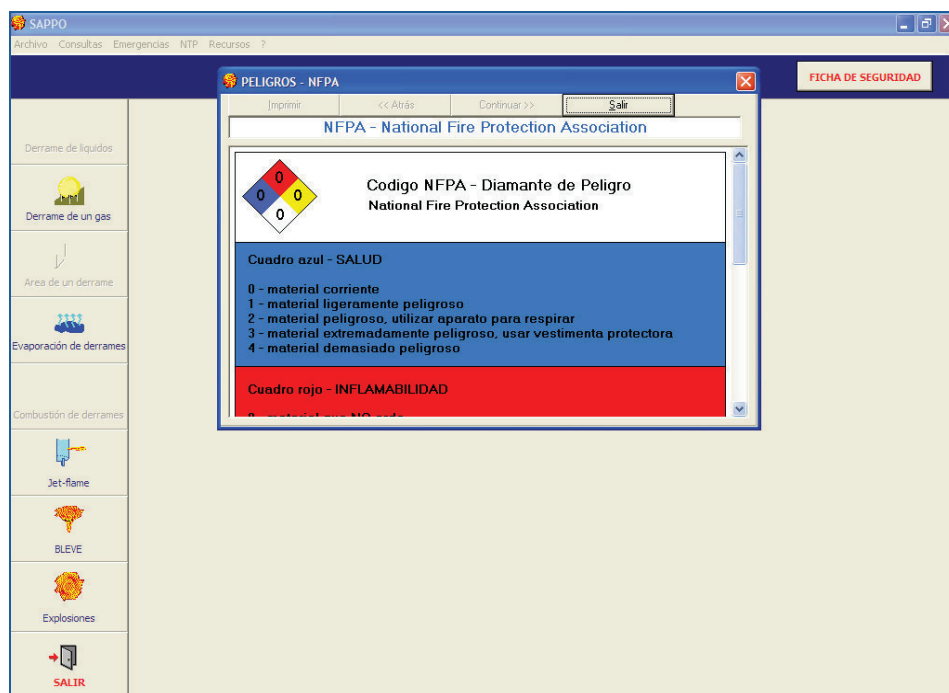


**Esquema APPO.12.** Panel naranja.



**Esquema APPO.13.** Panel naranja en un camión-cisterna de etanol

- **Peligros NFPA**, el cual abre una pantalla (Esquema APPO.14) de información en la que se indica la clasificación de los peligros de las mercancías peligrosas según el código NFPA (National Fire Protection Association de EEUU).

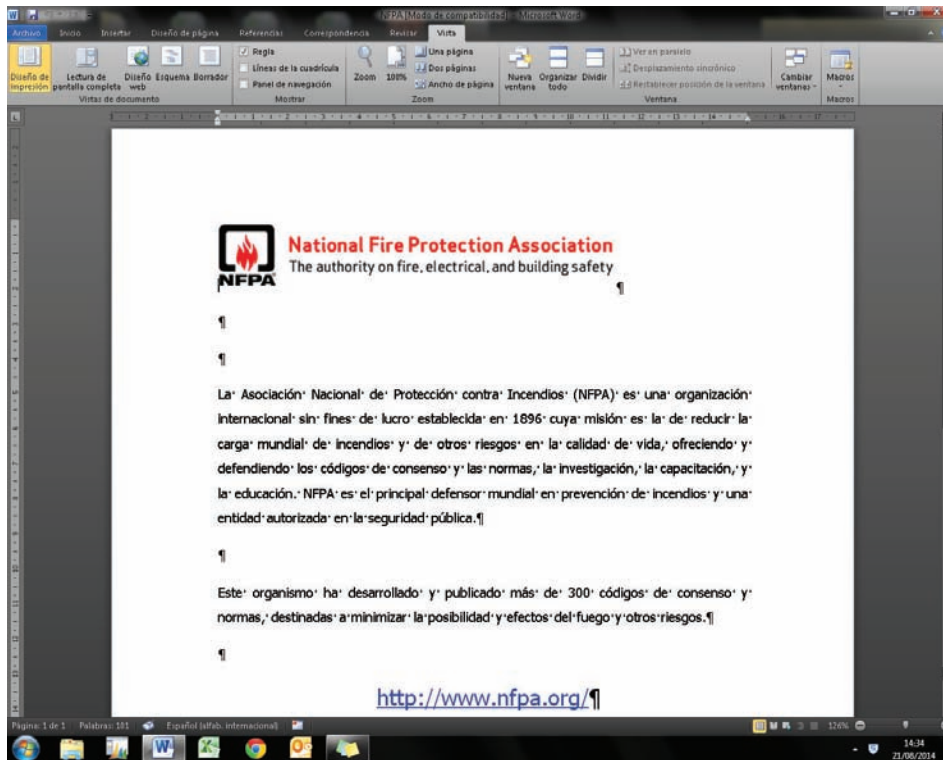


**Esquema APPO.14.** Código NFPA

El código NFPA (National Fire Protection Association) es usado en muchos países (entre ellos estados Unidos) para indicar/comunicar los riesgos de las mercancías peligrosas.

En un mundo globalizado como el de hoy, se pueden ver en nuestra comunidad unidades de transporte de mercancías peligrosas que incluyen en su etiquetado el "diamante de peligro" de la NFPA, pues es de obligado uso en el país de origen de la mercancía.

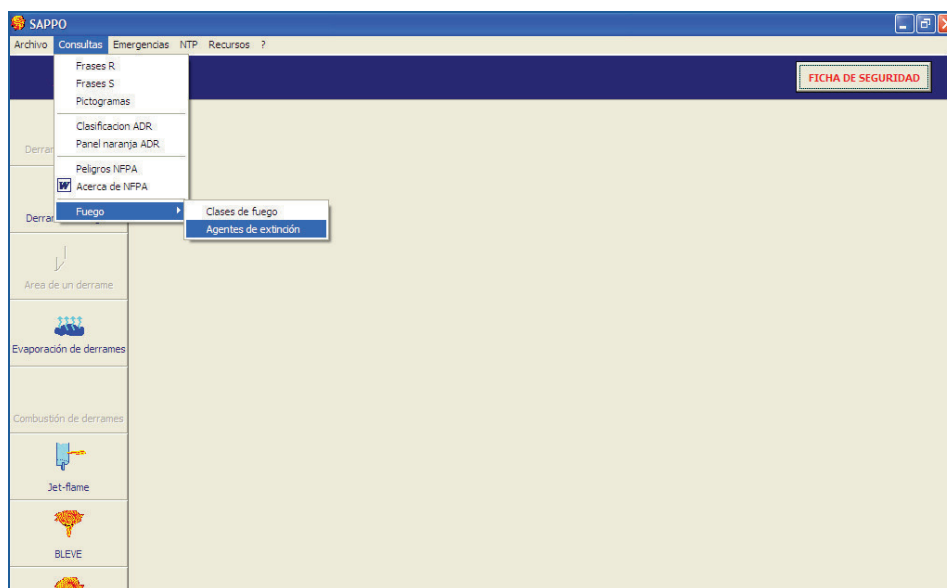
- **Acerca de la NFPA**, el cual abre un documento **Word** (véase el esquema APPO.15) de información sobre la NFPA (traducción al castellano de la información declarada en la web oficial de la NFPA).



**Esquema APPO.15.** Información

- **Fuego**, en este punto, la barra de menús se despliega en dos opciones cada una de las cuales abrirá una pantalla o formulario flotante en la modalidad *showmodal* con toda la información relacionada con:
  - **Clases de fuego** (véase Esquema APPO.17)
  - **Agentes de extinción** (véase Esquema APPO.18)

El Esquema APPO.16 muestra la barra de menús.

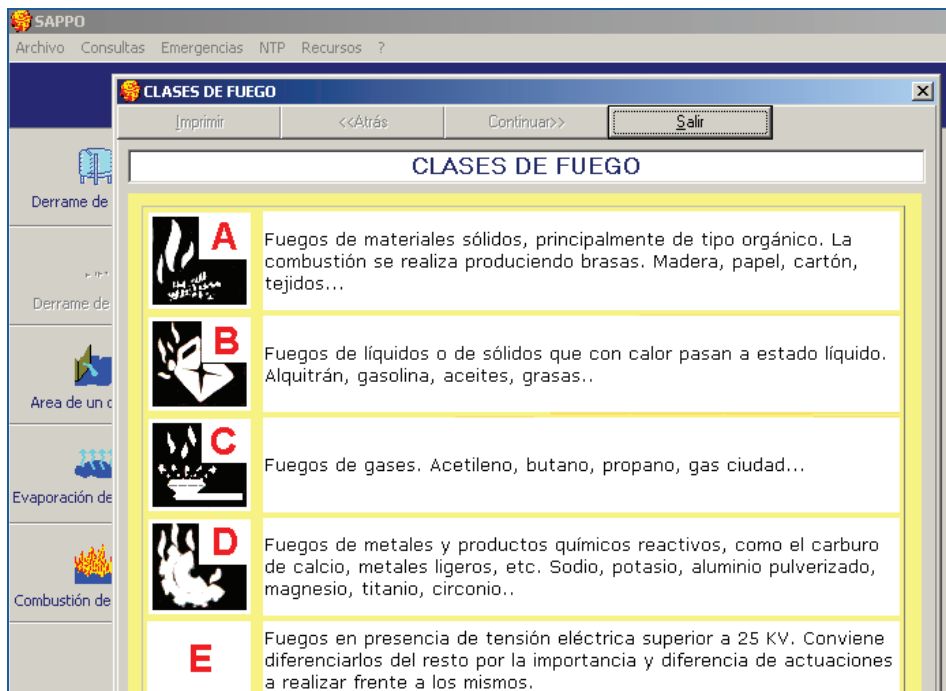


**Esquema APPO.16.** Barra de menús.

Cada una de las cuales abrirá a su vez una pantalla flotante que aportará la información del tema seleccionado.

Esta información es básica para el caso del incendio de líquidos inflamables derramados, bleves y dardos de fuego. Una mala elección del agente extintor en una emergencia, puede agravar seriamente la situación:

- Dispersar el fuego
- "Avivar" el fuego
- Explosión



Esquema APPO.17. Clases de fuego.

**AGENTES DE EXTINCION**

AGENTE EXTINTOR	CLASE DE FUEGO				
	A	B	C	D	E
Agua Pulverizada	Muy adecuado	Aceptable (combustibles líquidos no solubles en agua, gas-oil, aceite...)			Peligroso
Agua a Chorro	Adecuado				Peligroso
Polvo BC (convencional)		Muy adecuado	Adecuado		
Polvo ABC (polivalente)	Adecuado	Adecuado	Adecuado		
Polvo Especifico Metales				Adecuado (Consultenos)	
Espuma Física	Adecuado	Adecuado			Peligroso
Anhidrido Carbónico (CO <sub>2</sub> )	Aceptable (Fuegos pequeños. No apaga las brasas)	Aceptable (Fuegos pequeños)		Aceptable	Aceptable (Excelente para salas de ordenadores)
Hidrocarburos Halogenados	Aceptable (Fuegos pequeños)	Adecuado (Fuegos pequeños)			Aceptable

Esquema APPO.18. Agentes de extinción.

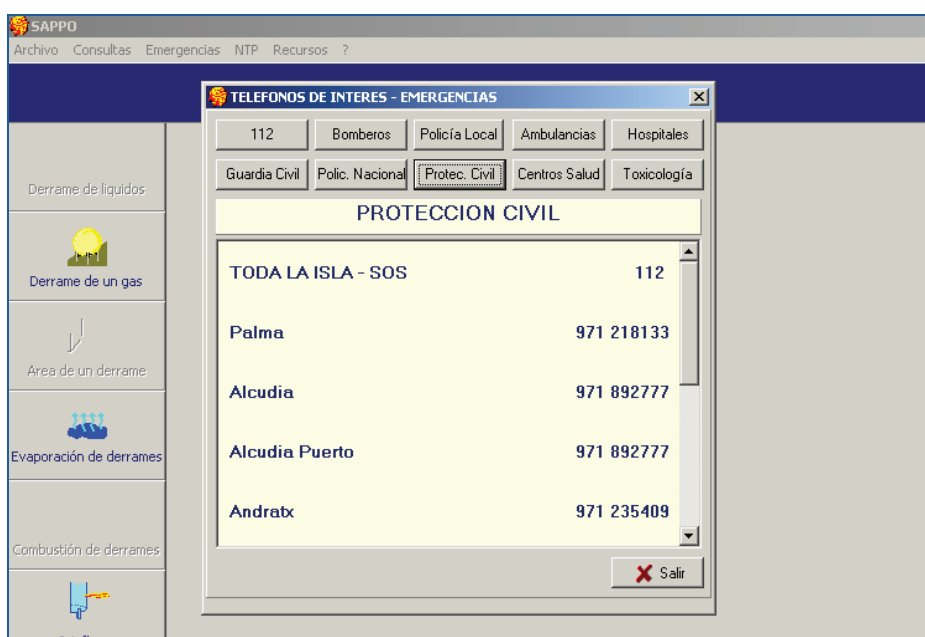
Con toda esta información, el mando tendrá todas las herramientas necesarias para identificar la o las sustancias que están involucradas en la emergencia y conocer los peligros y riesgos a los que se ha de enfrentar.

Mucha de esta información se encuentra en la documentación que lleva el conductor o encargado de transporte y también señalizada de una forma bien visible (delante, detrás y a ambos lados) en el vehículo y anexos de la unidad de transporte.

En el caso concreto de las Islas Baleares, tenemos la suerte de que todas estas mercancías llegan a la comunidad por vía marítima y son controladas/inspeccionadas a la salida del muelle por la Autoridad Portuaria y Guardia Civil de Tráfico.

## 4.2 Emergencias

El segundo punto de este módulo corresponde a la opción de **Emergencias**, la cual aporta mediante una "pantalla flotante" en modalidad *showmodal* los **teléfonos** de mayor interés en una emergencia para cada municipio de Mallorca (esquema APPO.19).



**Esquema APPO.19.** Teléfonos de interés.

Concretamente aporta (en el caso de que los haya), los teléfonos de:

- Bomberos
- Policía Local
- Ambulancias
- Hospitales y clínicas
- Guardia Civil
- Policía Nacional
- Protección Civil
- Centros de salud

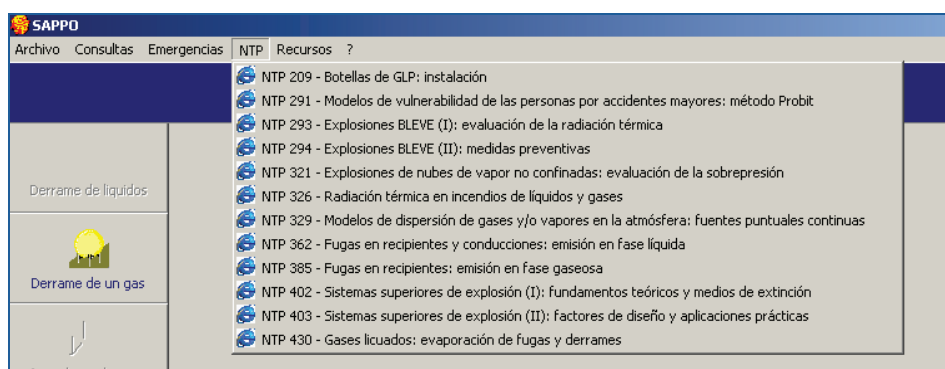


- Servicios de información toxicológica

### 4.3 NTP

El tercer punto de este módulo corresponde a la opción **NTP**, el cual aporta los documentos originales NTP (Notas Técnicas de Prevención) elaborados por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo específicos para cada tipo de accidente contemplado en el programa APPO

En el Esquema APPO.20 aparece el listado de las Notas Técnicas de Prevención.



**Esquema APPO.20.** Notas técnicas de prevención.

En ellas se indican muchas de las ecuaciones matemáticas utilizadas por este programa informático.

En la parte superior derecha de la pantalla se encuentra un botón que aporta la ficha de seguridad elaborada por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo de la sustancia implicada en el accidente.

Se observa el botón en el Esquema APPO.21. y, a modo de ejemplo, la Ficha de Seguridad del Etanol de la base de datos del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, desplegada en el navegador Internet Explorer.

**ETANOL** Nº ONU: 1170 FICHA DE SEGURIDAD

Nº CAS 64-17-5. International Chemical Safety Cards (WHO/IPCS/ILO) - Microsoft Internet Explorer

Dirección: C:\Sappo\FS\1170.htm

### Fichas Internacionales de Seguridad Química

**ETANOL (anhidro)** ICSC: 0044








**MINISTERIO DE TRABAJO Y ASUNTOS SOCIALES**



**INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO**

ETANOL (anhidro)  
 Alcohol etílico  
 $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}/\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$   
 Masa molecular: 46.1

Nº CAS 64-17-5

Nº RTECS KQ6300000

Nº ICSC 0044

Nº NU 1170

Nº CE 603-002-00-5



TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	Altamente inflamable.	Evitar las llamas. NO producir chispas y NO fumar. NO poner en contacto con oxidantes fuertes.	Polvo, espuma resistente al alcohol, agua en grandes cantidades, dióxido de carbono.
EXPLOSION	Las mezclas vapor/aire son explosivas.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. NO utilizar aire comprimido	En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua.

Descargando desde el sitio: file:///C:/Sappo/FS/1170.htm

**Esquema APPO.21.** Botón de acceso a la ficha de seguridad.

## 5. APPO - Base de datos

El segundo módulo del programa informático corresponde a las bases de datos. Delphi es un lenguaje de programación que facilita la creación de aplicaciones que acceden a bases de datos, tanto locales (por ejemplo, usando ficheros de Access, dBase o Paradox) como a servidores de bases de datos remotos (Internase, MySQL, Oracle, Informix, DB2, PostgreSQL,...o cualquier servidor que provea una conexión ODBC o ADO).

Delphi tiene un gran número de componentes para el acceso a las bases de datos, cada uno especializado para un tipo de base de datos en concreto. Esto hace que el acceso sea eficiente. Lo hace mediante la llamada arquitectura BDE (Borland Database Engine).

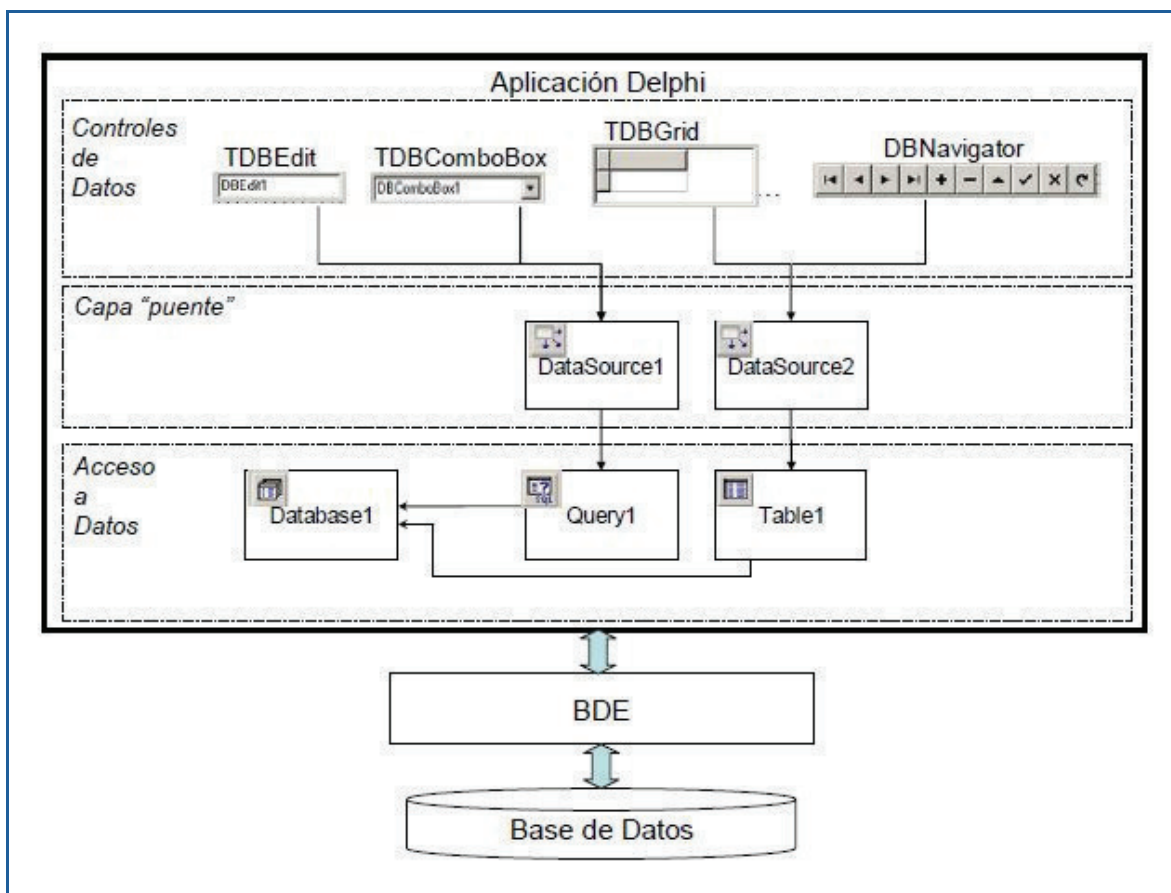
La arquitectura del BDE se divide en tres capas que permiten lograr un cierto nivel de "independencia física" de la aplicación con respecto a la base de datos que se use.

Las tres capas son:

- Acceso a Datos: estos componentes se encuentran en la paleta de componentes. Son no visuales, que realizan el acceso físico real a los datos.
- Componentes "puente": están colocados en la pestaña Data Access, y se utilizan para vincular los de acceso a datos con los visuales o controles de datos. Destaca el uso del TDataSource.

- Controles de datos: están en la pestaña Data Controls. Son visuales, similares a los componentes que permiten ver o editar textos en Windows (TLabel, TEdit, TMemo, ...) pero que en este caso permiten visualizar y modificar los datos, etc. Destacan los TDBLabel, TDBEdit, etc.

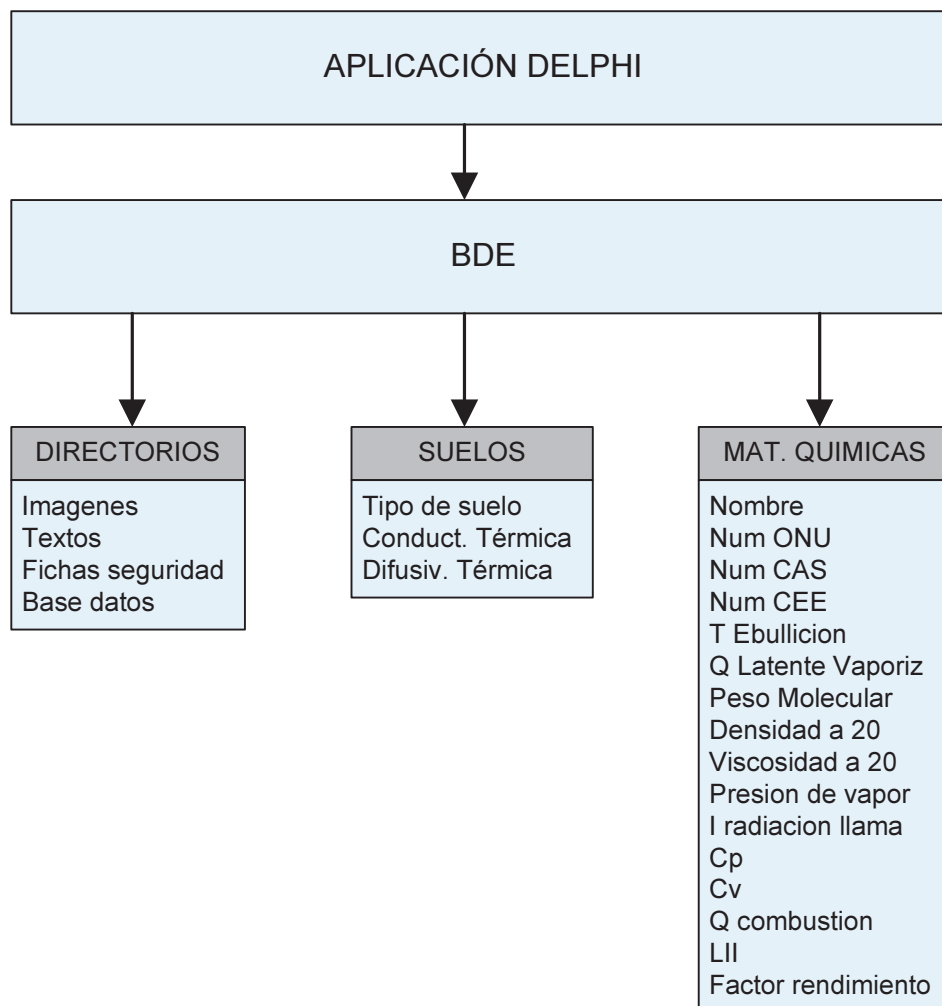
Cuya representación esquemática es la siguiente Esquema APPO.22:



**Esquema APPO.22.** Arquitectura del BDE en tres capas.

Por facilidad y simplicidad de uso, se ha utilizado para el programa APPO una base de datos de Microsoft Access – 97 (1997), pues es sencilla de usar, accesible a todos los usuarios y apta para cualquier ordenador del mercado.

Las tablas definidas en el programa se representan en el Esquema APPO.23. No ha hecho falta recurrir a interconexiones relacionales entre ellas:



**Esquema APPO.23.** Base de datos APPO.



## 6. APPO - Módulo de cálculos

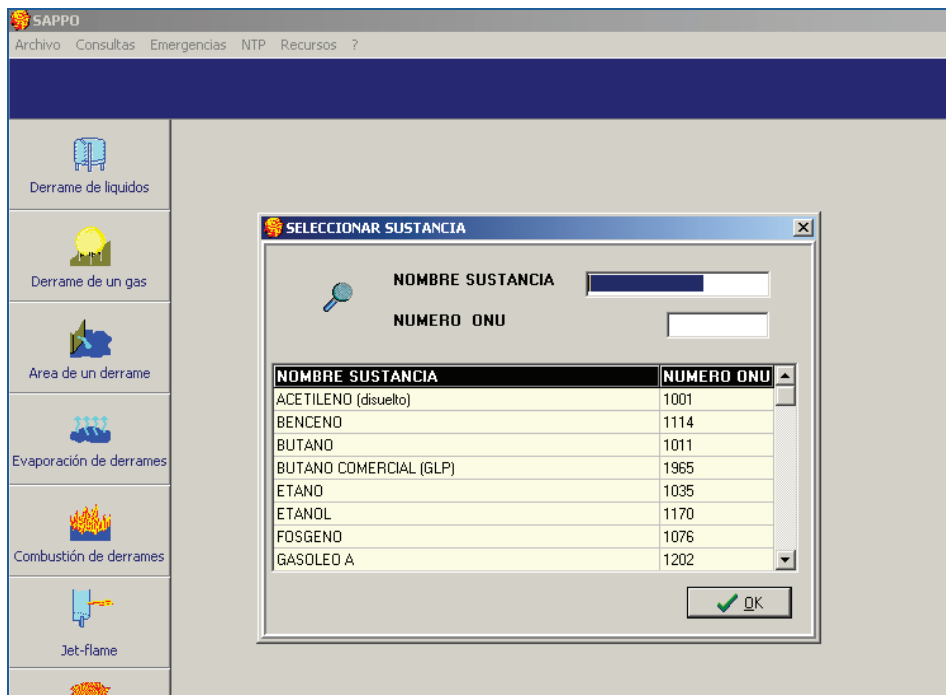
El módulo de cálculos es el bloque que mediante simulaciones y cálculos matemáticos aporta la información que necesita el mando para ejercer correctamente su función ante una emergencia.

Todo accidente puede ser considerado como una sucesión de efectos que pueden conducir a la generación de efectos perjudiciales para el hombre y/o el medio ambiente. Cada uno de estos efectos puede ser simulado mediante modelos matemáticos de cálculo.

La correcta aplicación y acoplamiento de estos modelos permitirá predecir las consecuencias que tendrán los accidentes.

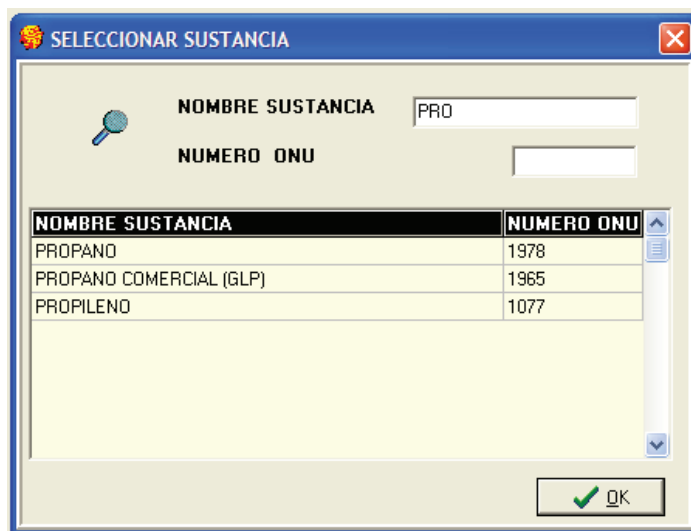
Para conseguirlo, el primer paso que ejecuta APPO cuando se inicia, es el de solicitar al usuario mediante un formulario o pantalla flotante la mercancía o producto peligroso implicado en el accidente o emergencia (véase el Esquema APPO.24).

La lista de materias peligrosas se encuentra en la base de datos Microsoft Access que tiene APPO. Esta base de datos está abierta, es decir, se pueden añadir nuevas materias o borrar las que no procedan.



Esquema APPO.24. Selección de sustancia.

Esta puede ser seleccionada mediante el nombre. Conforme se va escribiendo el nombre, el programa APPO acota las sustancias a seleccionar. Si se escribe PRO, el programa consultará en su base de datos y expondrá todas las sustancias que tienen la leyenda "pro" en su nombre (véase el esquema APPO.25).



Esquema APPO.25. Selección de sustancia.



El número ONU (número de cuatro dígitos, asignado a cada sustancia en cooperación con al ONU, cuya utilización es internacional. Real Decreto 2216/85.) es otro criterio de búsqueda (Esquema APPO.26). Este número se encuentra en la documentación que acompaña la expedición y también en el panel naranja que llevan las unidades de transporte.

NOMBRE SUSTANCIA	NUMERO ONU
BENCENO	1114
BUTANO	1011
ETANOL	1170

**Esquema APPO.26.** Selección de sustancia.

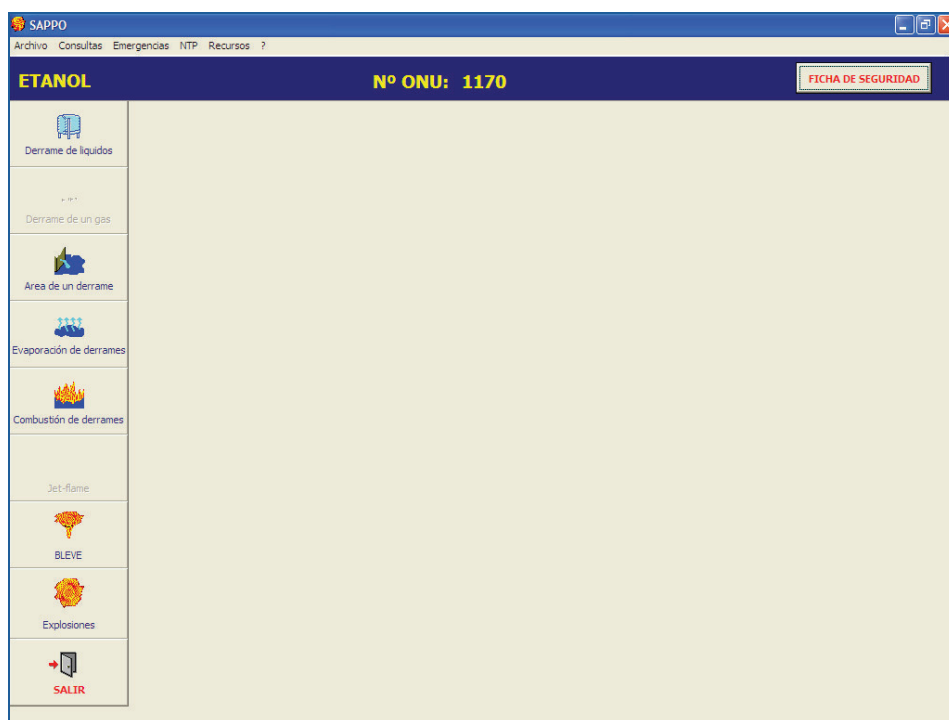
Una vez seleccionada la sustancia, el mando o usuario, puede acceder al módulo de cálculos haciendo uso de la barra de menús que se encuentra en la parte izquierda de la pantalla del programa APPO (véase el Esquema APPO.27).

Las emergencias que contempla el módulo de cálculos de la herramienta informática APPO son:

- Derrames de líquidos
- Derrames de gases
- Predicción del área que ocupará un derrame (en condiciones ideales)
- Evaporación de derrames
- Combustión de derrames
- Jet-flame (dardos de fuego)

- BLEVE
- Explosiones

Sólo aparecen activadas las opciones que pueden afectar a la sustancia seleccionada. En el caso del etanol (líquido inflamable), los botones de "derrame de un gas", y de "jet-flame" no estarán activados. Si hubiera seleccionado la sustancia propileno gas, entonces las opciones de "derrame de líquidos", "área de un derrame", etc. no estarían activadas.



**Esquema APPO.27.** Módulo de cálculos APPO.

En la parte superior de la pantalla, aparece siempre el nombre de la sustancia seleccionada, su número ONU y el botón que da acceso a la ficha de seguridad.

## Derrame de líquidos

El primer punto de este módulo corresponde al **derrame de líquidos**, entendiendo por derrame la salida incontrolada de un líquido que puede ocurrir por la aparición de un orificio limitado o por una rotura catastrófica del depósito que lo contiene. Se observa en este proceso que:

- La pérdida del contenido a través de fisuras o perforaciones es casi continua.
- El producto derramado permanece líquido durante la fuga.
- El proceso es isoterma: no hay cambio de temperatura. Ello suele ocurrir en diferentes situaciones: cuando no hay cambios importantes de densidad (líquidos) o cuando la presión en el recipiente se mantiene casi constante durante la fuga.

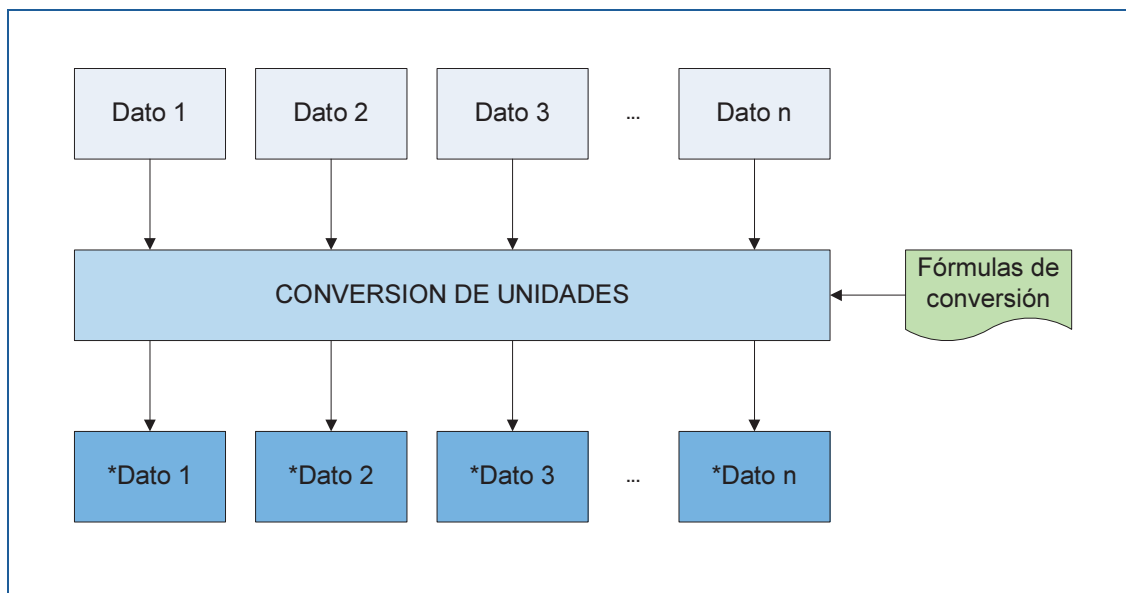
El objetivo principal de APPO será el de describir correctamente dos variables:

- La cantidad de fluido liberada.
- El tiempo que ha tardado en liberarla.

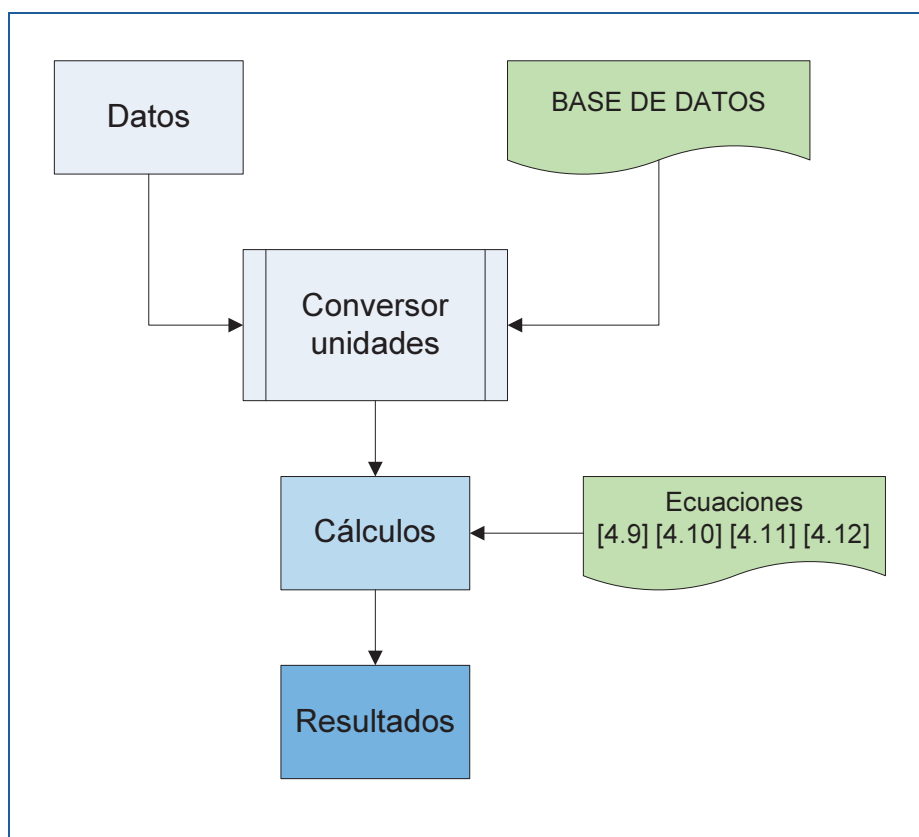
Activando la herramienta **derrame de líquidos** se despliega una única pantalla o formulario que aportará en todo momento los datos de entrada del accidente:

- Tipo y dimensiones del depósito
- Cantidad de líquido que hay en su interior
- Temperatura en el interior del depósito
- Tipo y dimensiones del orificio por donde se derrama el fluido

Internamente, el programa adquirirá de su base de datos los valores de densidad y viscosidad del líquido seleccionado a la temperatura indicada y si fuere necesario, modificará los datos de partida a las unidades pertinentes para poder aplicar los modelos matemáticos (véanse los esquemas APPO.28 y APPO.29).



**Esquema APPO.28.** Procedimiento de conversión de unidades




**Esquema APPO.29.** Procedimiento de cálculo

Los resultados aparecen en la misma pantalla en la que se introdujeron todos los datos de partida.

En todo momento sigue siendo accesible la ficha de seguridad y las NTP (Notas Técnicas de Prevención).

Toda la información está agrupada en una única pantalla (Esquema APPO.30).



Archivo Consultas Emergencias NTP Recursos ?

**ETANOL**

**Nº ONU: 1170**

**FICHA DE SEGURIDAD**

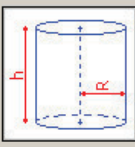
**Clase de Depósito**

Cuadrado

Cilíndrico horizontal

Cilíndrico vertical

Esférico



Altura [metros]

Lado 1 [metros]

Lado 2 [metros]

Radio [metros]

**Condiciones del fluido**


Temperatura en el interior del depósito [°C]


Contenido:  masa  volumen


[kg]


[litros]


**Orificio - características**


  
Cd = 0.62

  
Cd = 0.82

  
Cd = 0.50

  
Cd = 0.94

  
Cd = 1.00

  
Cd = 1.00

Coef. descarga Cd  (cm)

Díametro orificio  (cm)

Altura desde base   (metros)

Libros derramados

TIEMPO [minutos]  [seg]  [min]

TIEMPO que tarda en vaciarse el depósito [hrs]  [min]

LITROS en tanque  LITROS derramados

LITROS en tanque  LITROS derramados

LITROS en tanque  LITROS derramados

LITROS en tanque  LITROS derramados

LITROS en tanque  LITROS derramados

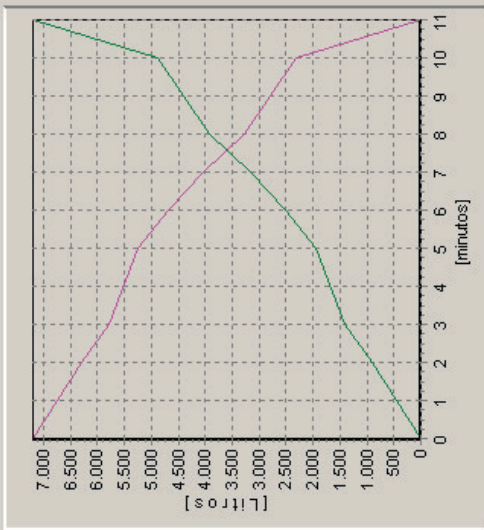
LITROS en tanque  LITROS derramados

LITROS en tanque  LITROS derramados

LITROS en tanque  LITROS derramados

LITROS en tanque  LITROS derramados

LITROS en tanque  LITROS derramados



Esquema APPO.30. Pantalla de introducción de datos de partida.

## Derrame de gases

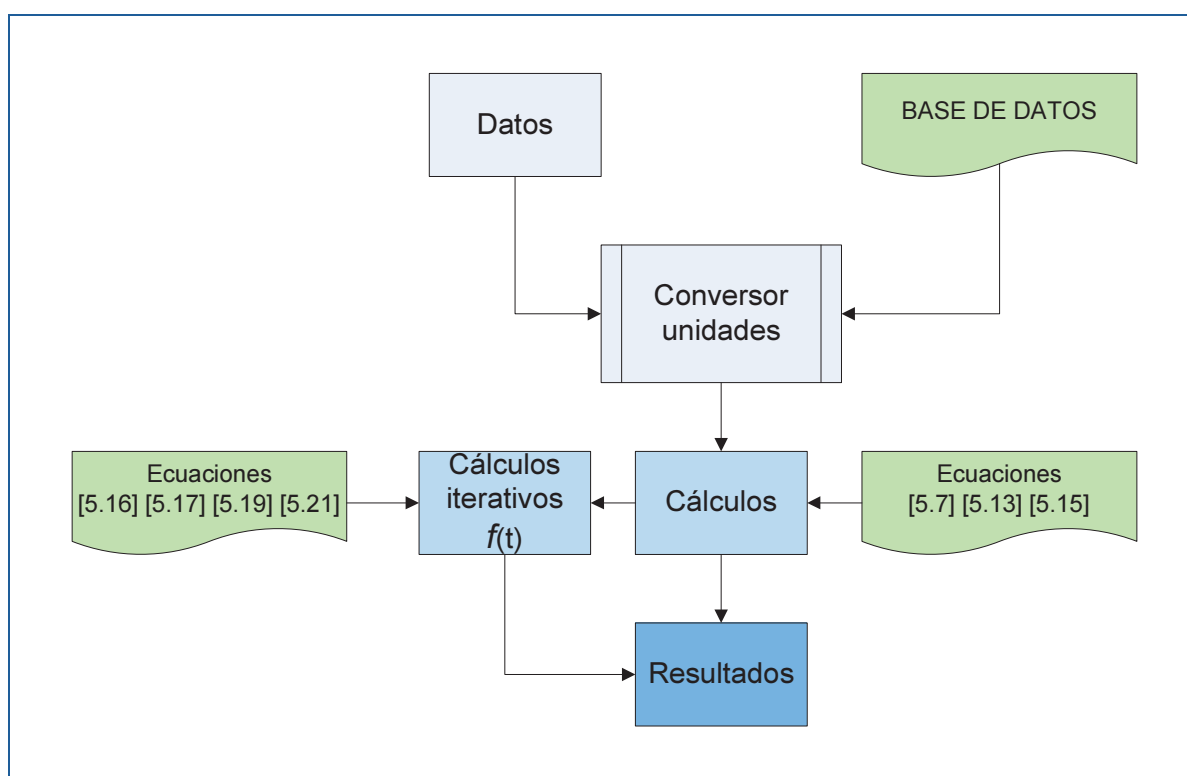
El segundo punto de este módulo corresponde al **derrame de gases**, el cual se despliega también en una única pantalla que aportará en todo momento los datos de entrada del accidente o emergencia:

- Tipo y dimensiones del depósito o cantidad de gas que hay en su interior.
- Temperatura y presión en el interior del depósito.
- Tipo y dimensiones del orificio por donde se derrama el fluido.

El procedimiento que sigue APPO (Esquema APPO.31) es el mismo que en los derrames de líquidos pero con otras ecuaciones y limitaciones.

El objetivo principal de APPO será el de describir correctamente dos variables:

- La cantidad de fluido liberada.
- El tiempo que ha tardado en liberarla.
- Cómo evoluciona el sistema en función del tiempo transcurrido.

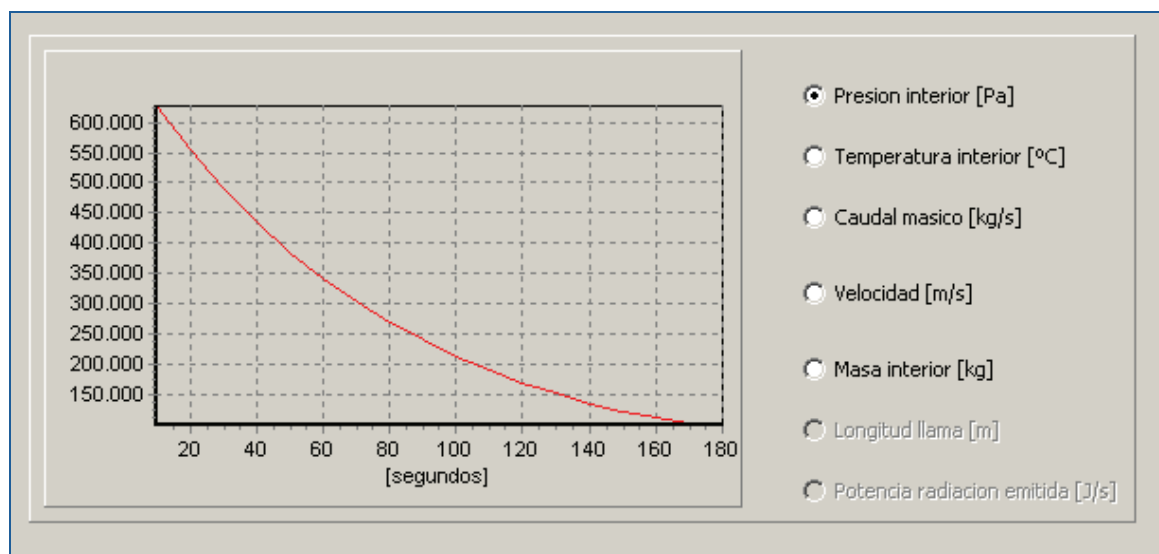


**Esquema APPO.31.** Procedimiento de cálculo

En este caso, los resultados que aporta APPO no son visibles de una forma tan inmediata, se encuentran en una tabla tipo "hoja de cálculo" (Esquema APPO.33) cuyos valores pueden ser exportados "fácilmente" a una hoja de cálculo Excel por parte del usuario para poder realizar todo tipo de cálculos complementarios que desee.

Una representación gráfica muy intuitiva complementa el inconveniente de no poder ver todos los datos aportados por el programa. Esta representación gráfica facilitará y agilizará al mando en la tarea de "toma de decisiones".


Permite ver en función del tiempo la evolución de la presión en el interior del depósito (Esquema APPO.32), temperatura en el interior del depósito, el caudal másico, la velocidad de salida y la masa de fluido que hay en el interior del depósito.



**Esquema APPO.32.** Procedimiento de cálculo

En todo momento sigue siendo accesible la ficha de seguridad y las NTP (Notas Técnicas de Prevención) relacionadas con el accidente.





Archivo Consultas Emergencias NTP Recursos ?

**BUTANO COMERCIAL (GLP)**

**Nº ONU: 1965**

**FICHA DE SEGURIDAD**

**Datos del Depósito**

Volumen [litros]

Cuadrado

Cilíndrico horizontal

Cilíndrico vertical

Esférico

[litros]

Altura

Lado 1

Lado 2

Radio

Temperatura  [°C]

Presión  [atm]

Diámetro orificio  [cm]

Cd

Tempo [s]	Tipo de flujo	Presion int [Pa]	Temp int [K]	Temp int [°C]	Densitat f(T) [kg/m3]	Caudal mastico [kg/s]	Velocidad Fuga [m/s]	Velocidad Fuga Mas [kg]
0	Sonico	709275	298	24,99	16,567	3,632	1532,43	0
10	Sonico	626823	293	20,6	14,86	3,233	1487,59	39
20	Sonico	554461	289	16,44	13,333	2,88	1443,24	68
30	Sonico	490878	285	12,37	11,972	2,568	1398,97	95
40	Sonico	434958	281	8,39	10,758	2,291	1354,71	115
50	Sonico	385733	277	4,49	9,675	2,046	1310,43	140
60	Sonico	342364	273	0,67	8,707	1,828	1266,06	155
70	Sonico	304121	270	-3,06	7,841	1,635	1221,54	170
80	Sonico	270368	266	-6,73	7,067	1,464	1176,8	192
90	Sonico	240553	262	-10,32	6,373	1,311	1131,78	206
100	Sonico	214196	259	-13,84	5,769	1,175	1086,97	210

**EXPORTAR**

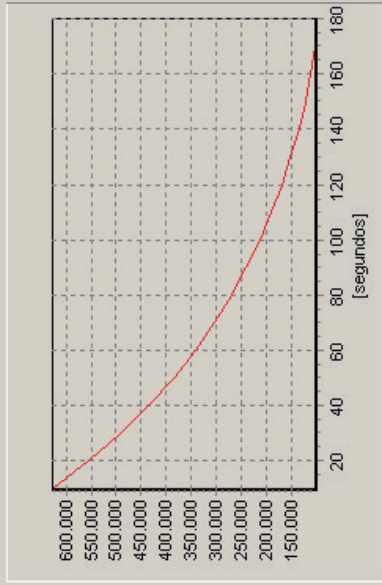
  

Tempo estimado de derrame  [minutos]

**EXPORTAR**

Presion interior [Pa]  
 Temperatura interior [°C]  
 Caudal mastico [kg/s]  
 Velocidad [m/s]  
 Masa interior [kg]  
 Longitud llama [m]  
 Potencia radiacion emitida [J/s]



Calcular

Otro calculo

Informe

Derrame de liquidos

Derrame de un gas

Area de un derrame


Evaporación de derrames

Combustión de derrames

Jet-flame

BLEVE

Explosiones

 **SALIR**

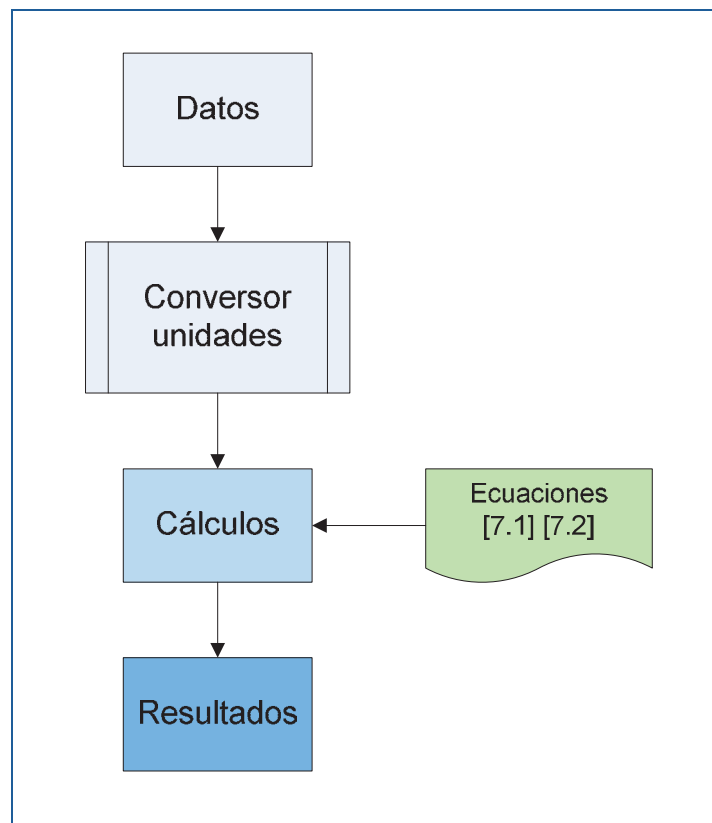
Esquema APPO.33. Pantalla de introducción de datos y de resultados.

## Área de un derrame

Como consecuencia de un derrame, fuga o escape de líquidos inflamables, se forma un charco de líquido cuya extensión depende de la geometría y naturaleza del suelo.

Para un caso ideal, el programa APPO calcula (Esquema APPO.34) cuál sería el área del charco.

Basta con activar la herramienta "área de un derrame" y se desplegará una pantalla compartida con otra herramienta: evaporación de un derrame. Aporta en todo momento el único dato de entrada que es necesario para ejecutar la aplicación: cantidad de fluido derramado:



**Esquema APPO.34.** Procedimiento de cálculo

**SAPPO**  
 Archivo Consultas Emergencias NTP Recursos ?

**ETANOL** **Nº ONU: 1170**

**AREA DE UN DERRAME**

**Cantidad derramada**

masa  [kg]

volumen  [litros]

**CALCULAR**

Area derrame en condiciones ideales  [m<sup>2</sup>]

Radio derrame en condiciones ideales  [m]

Densidad fluido derramado (valor medio)  [kg/m<sup>3</sup>]

Viscosidad fluido derramado (valor medio)  [kg/(m·s)]

**OTRO CALCULO** **INFORME**

**SALIR**

**Factores e**  
 masa derram  
 Area del derr  
 Temp fluido e  
 Velocidad de  
 Flujo de ev  
 Velocidad n  
 Tiempo de

[kg]

**Esquema APPO.35.** Area de un derrame.

La ficha de seguridad de la materia implicada y las NTP (Notas Técnicas de Prevención) están accesibles.

Quedan activadas la herramienta de "evaporación de derrames" y "combustión de derrames". Los datos calculados para predecir el área de un derrame pueden ser transferidos automáticamente a la nueva herramienta seleccionada (Esquema APPO.35).

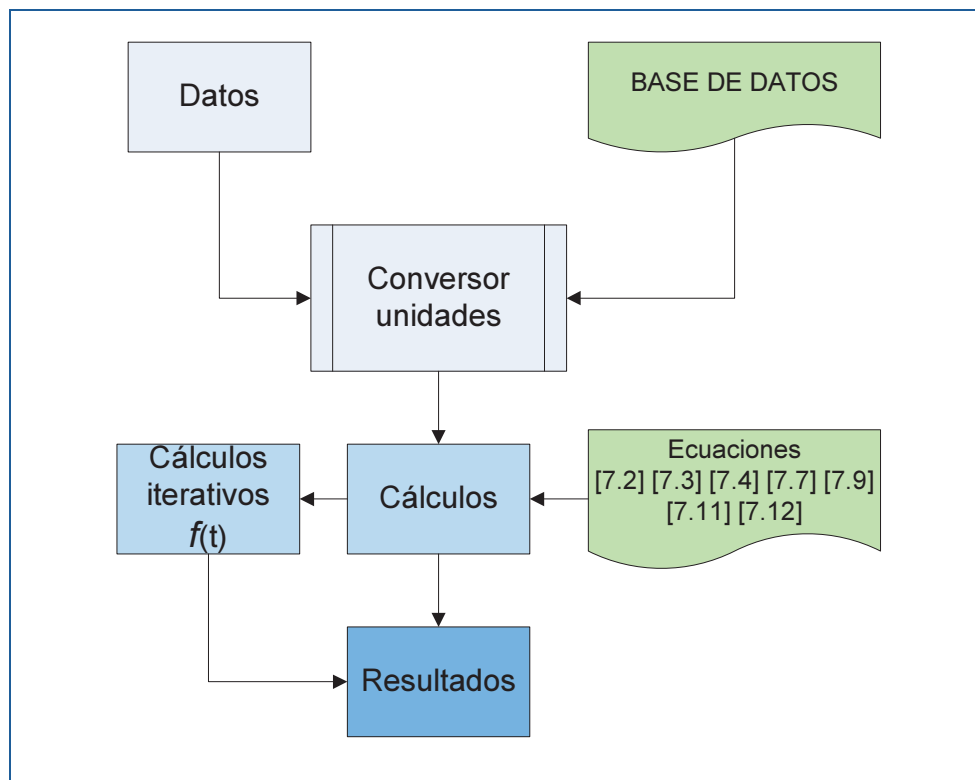
## Evaporación de un derrame

En este caso, el objetivo de APPO es:

- Calcular el caudal de evaporación por unidad de superficie y por unidad de tiempo.
- Predecir el tiempo que tardará en evaporarse todo el charco.

Activando la herramienta **evaporación de un derrame**, se despliega una pantalla compartida con la evaluación del área de un derrame (Esquema APPO.37). En ella se introducen los datos de entrada -algunos pueden provenir herramientas anteriores- (Esquema APPO.36):

- Cantidad de flujo derramado.
- Área del derrame y tipo de suelo.
- Temperatura del fluido derramado y Velocidad del viento.



Esquema APPO.36. Procedimiento de cálculo.



## Combustión de un derrame

Como consecuencia de un derrame, fuga o escape de líquidos inflamables se forma un charco de líquido cuya extensión dependerá de la geometría y naturaleza del suelo. Si se incendia, se producirán llamas cuya altura dependerá del diámetro del charco y del calor de combustión del líquido incendiado.

El efecto peligroso para estos casos es la radiación térmica generada.

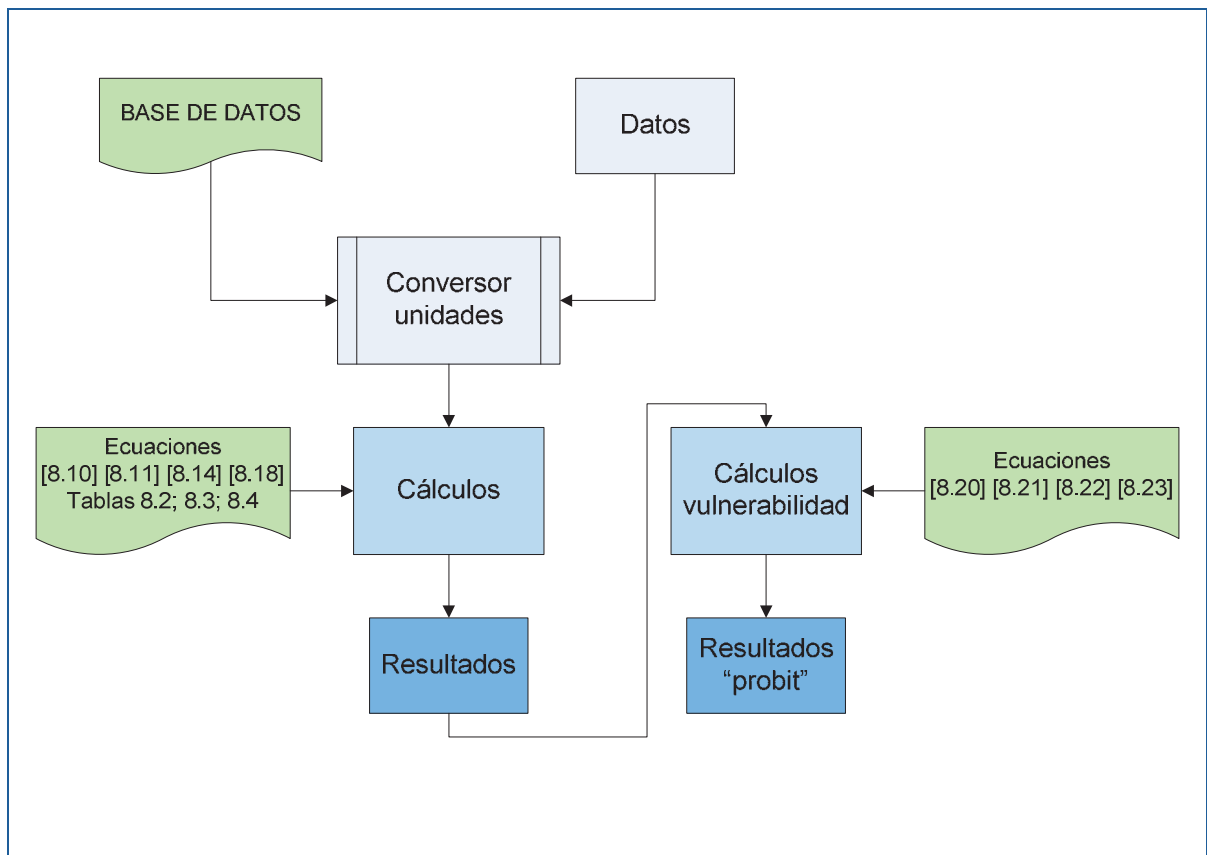
El modelo matemático que usa APPO para predecir la radiación térmica generada, se basa en la utilización de tablas y ecuaciones semiempíricas.

Activando la herramienta **combustión de un derrame**, se despliega una única pantalla que figurarán en todo momento los datos de entrada del accidente o emergencia:

- Cantidad de flujo derramado.
- Area del derrame.
- Temperatura del fluido derramado.
- Humedad relativa del aire.

Tanto la masa derramada como el área del derrame son datos que pueden proceder de cálculos anteriores.

Si se accede a esta herramienta desde "área de un derrame" o desde "evaporación de derrames", los datos mediante un procedimiento automático son traspasados a su casilla correspondiente en la nueva herramienta seleccionada, no hace falta volverlos a introducir.



**Esquema APPO.38** Procedimiento de cálculo.

Una vez se dispone de los resultados, el programa APPO permite evaluar (mediante la rutina de cálculo descrita en el Esquema APPO.38) de una forma muy sencilla: a diferentes distancias y a diferentes tiempos de exposición, cuál será la vulnerabilidad de las personas a la radiación percibida.

**SAPPO**  
Archivo Consultas Emergencias NTP Recursos ?

**Nº ONU: 1170**

**FICHA DE SEGURIDAD**

---

**ETANOL**

Derrame de líquidos

Derrame de un gas

Área de un derrame

Evaporación de derrames

Combustión de derrames

Jet-Flame

BLEVE

Explosiones

**SALIR**

**Cantidad en combustión**

masa [kg]  [25000]  
 volumen [litros]  [28434,94]

Área derrame en combustión  [m<sup>2</sup>]  
 Temperatura ambiente  [°C]  
 Humedad relativa aire  [%]

Calcular

Otro cálculo

Informe

Tasa de combustión  [kg/(s·m<sup>2</sup>)]

Área de la llama  [m<sup>2</sup>]

Altura teórica de la llama  [m]

Intensidad media de la radiación  [kW/m<sup>2</sup>]

Duración del incendio  [s]  [min]

Zona de Intervención  [m]

Zona de Alerta  [m]

**Vulnerabilidad [PROBIT]**

distancia - [m]

[minutos]

Intensidad de radiación  [kW/m<sup>2</sup>]

valor "Probit" ?

% de población con ropa afectada por quemaduras mortales

% de población sin protección afectada por quemaduras mortales

% de población afectada por quemaduras de 2º grado

% de población afectada por quemaduras de 1er. grado

**Esquema APPO.39** Combustión de un derrame.



## Jet-flame

En los recipientes de gas a presión, la aparición de una pequeña fisura en las paredes o la apertura de una válvula de seguridad trae como consecuencia el "derrame" del gas contenido, formando un chorro de gas a presión.

Si el gas es inflamable y durante la descarga entra en contacto con una fuente de ignición, entonces se forma un chorro de fuego o jet-flame.

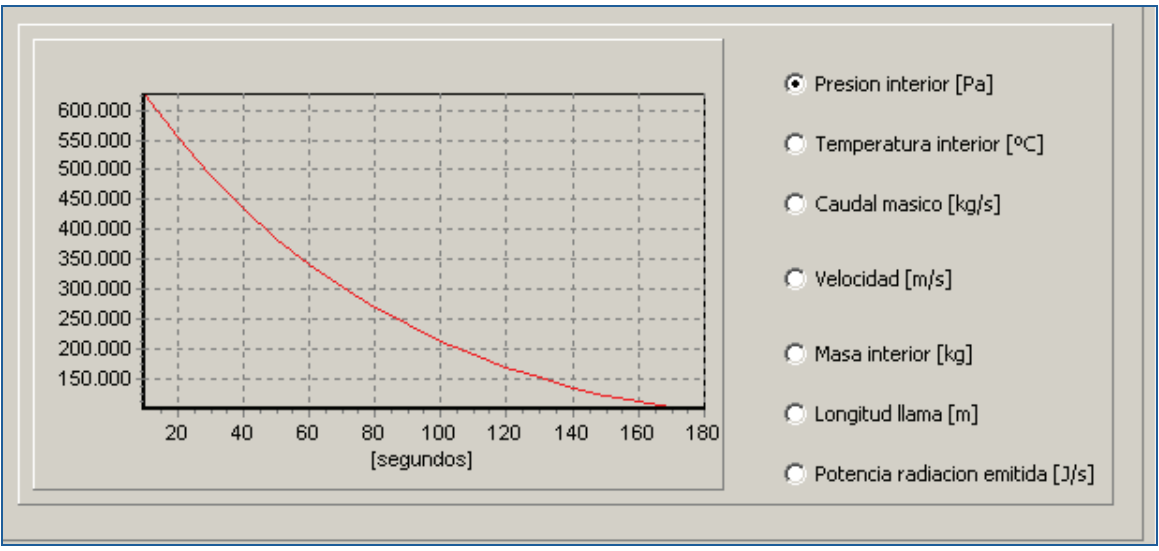
Los efectos de este tipo de accidentes son, fundamentalmente, los causados en el entorno por el calor generado e irradiado desde el dardo.

La herramienta correspondiente al denominado **jet-flame** (o dardo de fuego) despliega una única pantalla que aporta en todo momento los datos de entrada del accidente o emergencia (Véase Esquema APPO.42):

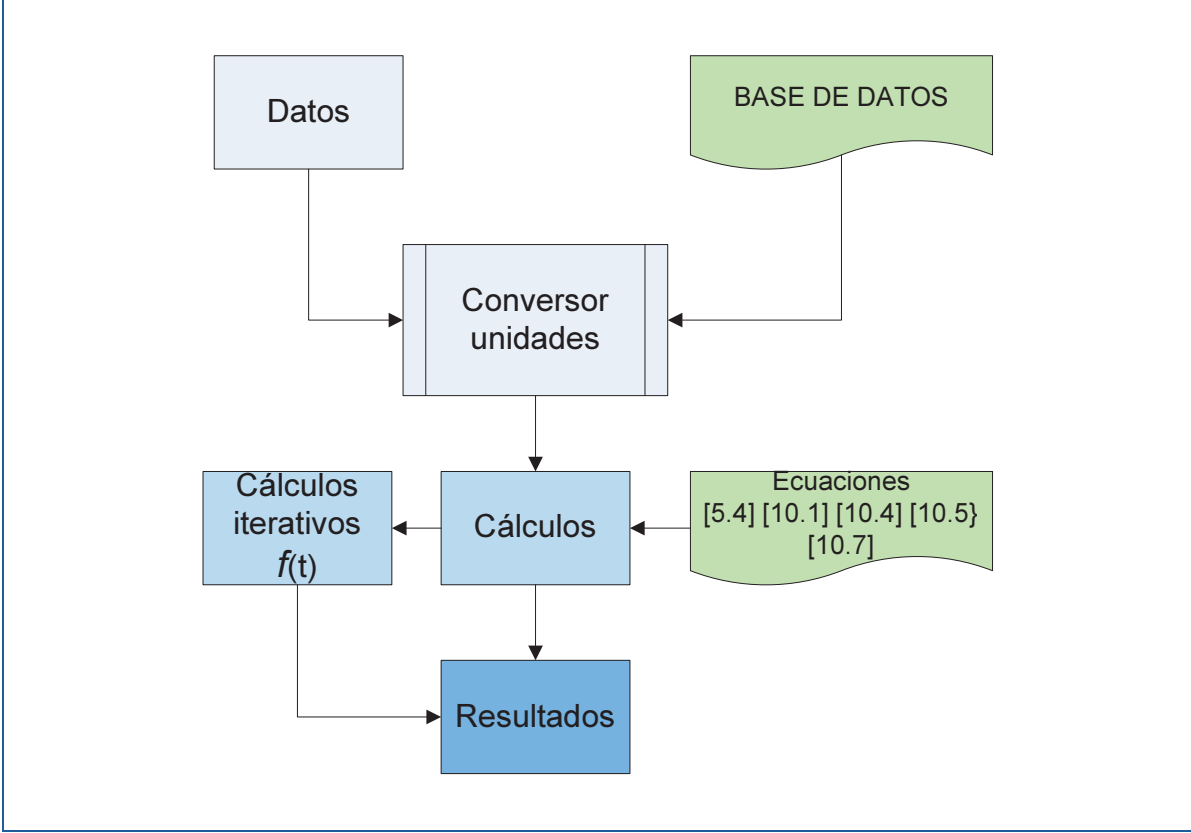
- Tipo y dimensiones del depósito o cantidad de gas que hay en su interior.
- Temperatura y presión en el interior del depósito.
- Tipo y dimensiones del orificio por donde se derrama el fluido.

Los resultados que aporta APPO, se encuentran en una tabla cuyos valores pueden ser exportados "fácilmente" a una hoja de cálculo Excel por parte del usuario para poder realizar todo tipo de cálculos complementarios que desee.

Una representación gráfica muy intuitiva (Esquema APPO.40) complementa los datos aportados por el programa, facilitando y agilizando de esta manera al mando en la tarea de "toma de decisiones". Permite ver en función del tiempo la evolución de la presión en el interior del depósito, temperatura en el interior del depósito, el caudal másico, la velocidad de salida y la masa de fluido que hay en el interior del depósito.



**Esquema APPO.40** Evolución de diferentes parámetros en función del tiempo.



**Esquema APPO.41** Procedimiento de cálculo

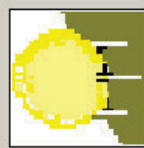
**Datos del Depósito**

Volumen [litros] 20000  
 Cuadrado  
 Cilíndrico horizontal  
 Cilíndrico vertical  
 Esférico

[litros]

Altura [metros]   
 Lado 1 [metros]   
 Lado 2 [metros]   
 Radio [metros]

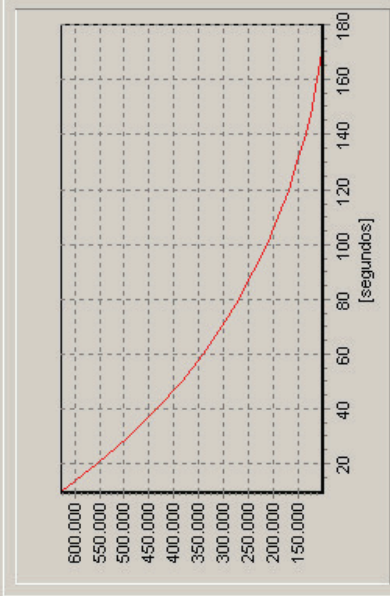
Temperatura [°C]   
 Presion [atm]   
 Diámetro orificio [cm]   
 Cd



Tiempo [s]	Tipo de flujo	Presion int [Pa]	Temp int [K]	Temp int [°C]	Densitat f(T) [kg/m3]	Caudal masico [kg/s]	Velocidad fuga [m/s]	Velocidad fuga Mas [kg]
0	Sonico	709275	298	24,99	16,567	3,632	1532,43	0
10	Sonico	626823	293	20,6	14,86	3,233	1487,59	39
20	Sonico	554461	289	16,44	13,333	2,88	1443,24	68
30	Sonico	490878	285	12,37	11,972	2,568	1398,97	95
40	Sonico	434958	281	8,39	10,758	2,291	1354,71	115
50	Sonico	385733	277	4,49	9,675	2,046	1310,43	140
60	Sonico	342364	273	0,67	8,707	1,828	1266,06	155
70	Sonico	304121	270	-3,06	7,841	1,635	1221,54	170
80	Sonico	270368	266	-6,73	7,067	1,464	1176,8	192
90	Sonico	240553	262	-10,32	6,373	1,311	1131,78	206
100	Continua	214106	260	-13,84	5,763	1,176	1086,37	216

Tiempo estimado de derrame  [minutos]

**EXPORTAR**



- Presion interior [Pa]
- Temperatura interior [°C]
- Caudal masico [kg/s]
- Velocidad [m/s]
- Masa interior [kg]
- Longitud llama [m]
- Potencia radiacion emitida [J/s]

Derrame de liquidos

Derrame de un gas

Area de un derrame

Evaporación de derrames

Combustión de derrames

Jet-flame

BLEVE



Explosiones



**SALIR**

**Esquema APPO.42. Jet-flame.**

## BLEVE

El término BLEVE se utiliza para designar las explosiones físicas en la que interviene un líquido en ebullición. Sus efectos son:

- Radiación térmica por la bola de fuego.
- Sobrepresión por la onda expansiva.
- Proyección de fragmentos metálicos o proyectiles del recipiente y piezas adyacentes.

De dichos efectos, la radiación es el más relevante.

La herramienta de APPO para este accidente despliega también en una única pantalla (Esquema APPO.45) en la que figurarán en todo momento los datos de entrada:

- Cantidad de fluido implicada
- Condiciones ambientales: humedad relativa del aire

y también los resultados.

La herramienta permite evaluar de una forma muy sencilla (Esquema APPO.44) a diferentes distancias y a diferentes tiempos de exposición, la vulnerabilidad de las personas a la radiación percibida (véase el Esquema APPO.43).

Modificando la distancia, el programa aporta los nuevos datos de vulnerabilidad para las personas (quemaduras de primer y segundo grado).

Se detalla a continuación la parte de la pantalla o formulario donde está dicha utilidad.

**Vulnerabilidad [PROBIT]**



Zona de intervencion  [m]      valor"Probit"  ?

Zona de alerta  [m]       % de población con ropa afectada por quemaduras mortales

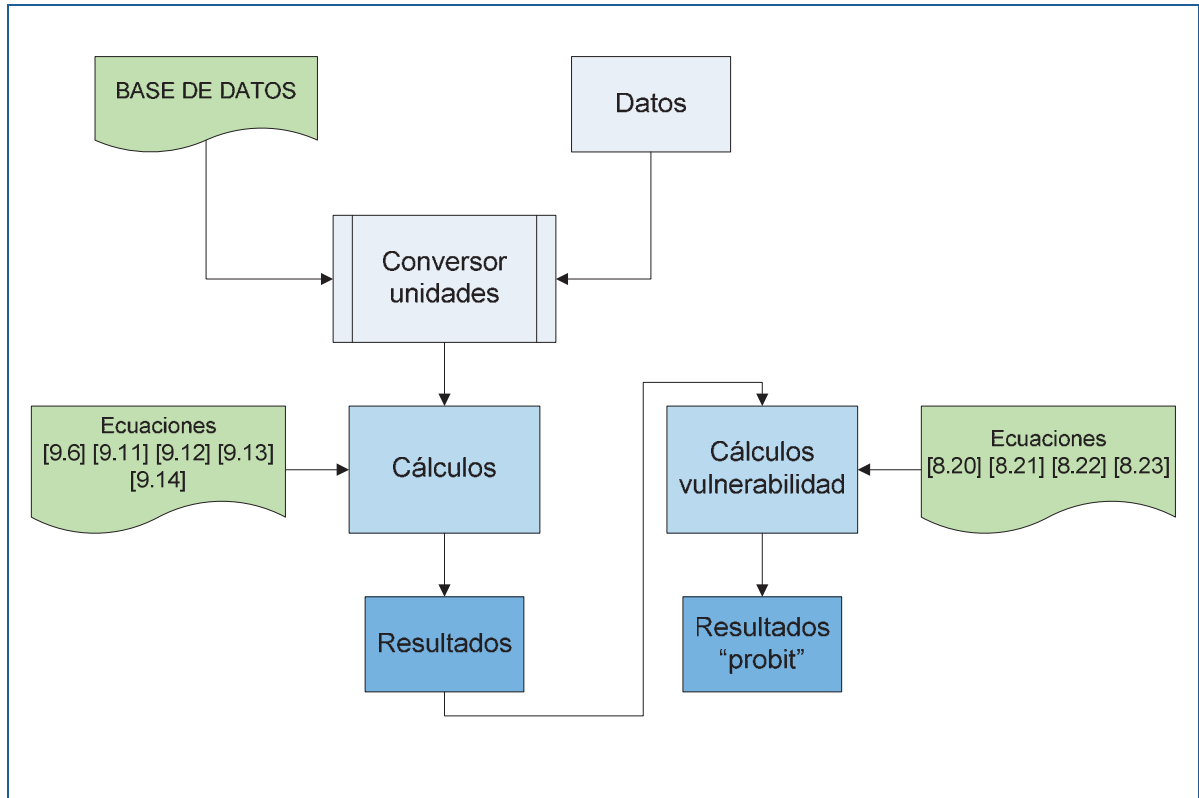
distancia - [m]   % de población sin protección afectada por quemaduras mortales

% de población afectada por quemaduras de 2º grado

% de población afectada por quemaduras de 1er. grado

**Esquema APPO.43.** Detalle de la presentación de vulnerabilidad a personas expuestas.



**Esquema APPO.44.** Procedimiento de cálculo

**SAPPO**  
Archivo Consultas Emergencias NTP Recursos ?

**ETANOL** Nº ONU: 1170

**FICHA DE SEGURIDAD**

**Derrame**

masa [kg]

volumen [litros]

Humedad Relativa aire [%]

[m]

[m]

[m]

[segundos]

[kW]

[kW/m2]

CALCULAR

OTRO CALCULO


INFORME

**Vulnerabilidad [PROBIT]**

Zona de intervención  [m]    valor "Probit"     ?     % de población con ropa afectada por quemaduras mortales

Zona de alerta  [m]         % de población sin protección afectada por quemaduras mortales

distancia - [m] 1316



    % de población afectada por quemaduras de 1er. grado

Derrame de líquidos

→

Derrame de un gas

↙

Area de un derrame


Evaporación de derrames

Combustión de derrames

Jet/flame

BLEVE

Explosiones

 **SALIR**

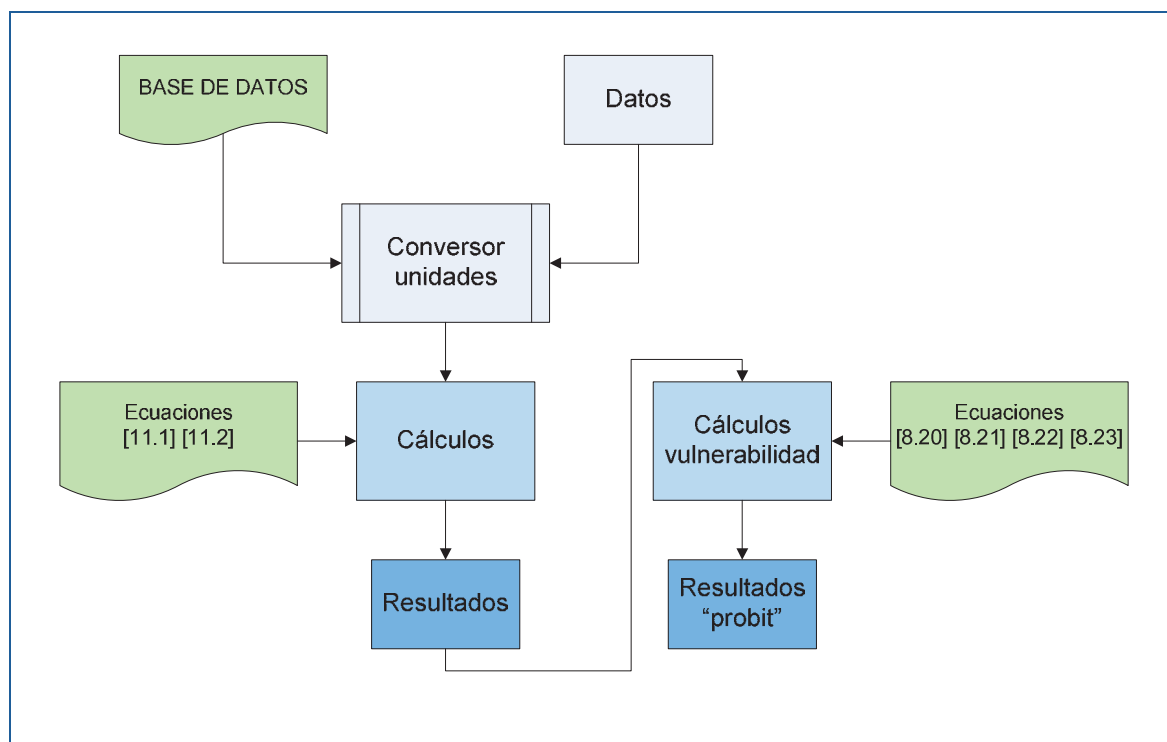
Esquema APPO.45. Pantalla para el cálculo de BLEVE

## Explosiones

Las explosiones que estudia el programa APPO son las denominadas explosiones de nubes de vapor no confinadas (unconfined vapour cloud explosión).

Este tipo de explosiones se originan debido a un escape de gran cantidad de gas o vapor inflamable o por una evaporación rápida de un líquido inflamable para formar una nube de características inflamables al ser mezclada con el aire. Cuando un gas inflamable se encuentra con una fuente de ignición, una parte de esta masa de gas deflagra y se produce la explosión.

La herramienta de **explosiones** despliega en una única pantalla (véase el esquema APPO.47) que aportará en todo momento los datos de entrada (masa de la nube) del accidente o emergencia y también los resultados obtenidos. La secuencia de cálculos está representada en el Esquema APPO.46.



**Esquema APPO.46.** Procedimiento de cálculo

Permite evaluar de una forma muy sencilla a diferentes distancias y a diferentes tiempos de exposición, la vulnerabilidad de las personas y de estructuras y materiales.

Esquema APPO.47. Pantalla de explosiones.



## Conclusiones



## Conclusiones y resultados

1. Se ha desarrollado el modelo informático **APPO** mediante el cual se puede simular un accidente de un escape de gases inflamables y de líquidos derivados del petróleo, evaluando y cuantificando las consecuencias de todo lo ocurrido.
2. Se ha simulado un vertido de gasolina de automoción de 95 octanos procedente de depósitos de distinta geometría, determinándose los tiempos de vaciado y la evolución del sistema en función del tiempo. Así para un depósito cilíndrico con un orificio circular de  $10 \text{ cm}^2$  y una temperatura ambiente de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , tarda en verterse o derramarse al entorno  $2000 \text{ m}^3$ , un tiempo de 28 horas y media.
3. Se ha simulado un vertido de etileno, procedente de una botella de 50 litros, a través de un orificio circular de  $0,1 \text{ cm}$  de diámetro, obteniéndose un tiempo de vaciado de 27,8 minutos. Igualmente, en función del tiempo, se ha obtenido la variación de la presión, de la temperatura interior, del caudal y de la velocidad de salida, al igual que de la masa derramada.
4. Se ha simulado igualmente un derrame de propano (GLP), procedente de una bombona de 106 litros, a través de un orificio cilíndrico de  $0,2 \text{ cm}$  de diámetro, obteniéndose una tiempo de vaciado de 24 minutos. También, en función del

tiempo, se ha obtenido la variación de la presión, de la temperatura interior, del caudal y de la velocidad de salida, al igual que de la masa derramada.

5. Se ha calculado el área teórica de una derrame de 24000 kilogramos de alcohol etílico, procedente de una cisterna, obteniéndose, una superficie y un radio de 810 m<sup>2</sup> y 16 m respectivamente.
6. Se ha estimado la evaporación de 24000 kilogramos de alcohol etílico, resultando ser de 317 minutos, para unas condiciones climáticas de un viento de 1 m/s y una temperatura de 25 °C.
7. Se ha determinado la tasa de combustión, la altura de las llamas, la intensidad media de la radiación y la duración del incendio de un vertido de 24000 kilogramos de etanol, obteniéndose unos valores de 0,03 kg/s.m<sup>2</sup>, 17 metros, 23 kw/m<sup>2</sup> y 43 minutos respectivamente. Igualmente se han determinado las dimensiones de las zonas de intervención y de alerta resultando ser de 3 y 13 metros.
8. También, para el incendio de 24000 kilogramos de etanol, se han determinado las vulnerabilidades (método "Probit") en función del tiempo de exposición y de la distancia al foco del incendio.
9. Para el caso de que se origine una BLEVE de un depósito esférico que contenga 200 m<sup>3</sup> de butano, el modelo **APPO** suministra la eficiencia del proceso, el radio máximo y la altura máxima de la bola de fuego, la duración estimada de dicha bola, y la intensidad media, resultando ser 136,6 metros; 204,9 metros; 16,9 segundos y 288 kW/m<sup>2</sup> respectivamente.
10. Se ha simulado el incendio de un vertido de etileno, procedente de un escape en forma de JET, procedente de una botella de 50 litros, a través de un orificio circular de 0,1 cm de diámetro. El tiempo de vaciado es fue de 27,8 minutos.

Igualmente, en función del tiempo, se ha obtenido la variación de la presión, de la temperatura interior, del caudal, de la velocidad de salida y de la masa derramada. También se ha estimado, en función del tiempo, la longitud de la llama originada y la potencia de la radiación emitida.

- 11.** Se ha simulado la explosión de una nube de 80000 kilos de propano obteniéndose su masa equivalente en TNT y las dimensiones de las zonas de intervención y alerta. Modificando las distancias se han determinado las vulnerabilidades (método "Probit") en función de la distancia al foco de la explosión.
- 12.** Como ventajas más importantes del modelo **APPO** se pueden destacar las siguientes:
  - i.** No es necesario introducir en el modelo una gran cantidad de datos para realizar los cálculos, ya que la mayoría de las variables físico-químicas de las sustancias se encuentran ya en la base de datos **APPO**.
  - ii.** El tiempo de ejecución del programa es mínimo ya que el lenguaje utilizado genera aplicaciones en código máquina, lo que trae como consecuencia que el ordenador las interpreta inmediatamente, al no precisar de un lenguaje interprete.
  - iii.** Se pueden programar directamente los componentes visuales e incluso crear nuevos controles que hereden las características de los ya existentes. Igualmente se pueden utilizar componentes visuales de otros lenguajes de programación y utilizar componentes estándar de las librerías de Windows.
  - iv.** Mediante la pantalla principal se tiene acceso al menú principal, a los botones de acceso rápido y a una Paleta de Componentes muy extensa. Dicha paleta da acceso a todos los componentes, denominados controles (campos de edición, listas desplegables y paneles), que pueden ser visualizados o no y que implementan las funciones básicas de la interfaz del usuario, el acceso a las bases de datos, etc.

- v. Igualmente mediante el Inspector de Objetos se puede visualizar y modificar las propiedades de todos y cada uno de los componentes, crearle nuevas propiedades y asociarle "event handlers".
  
- vi. Con el modelo **APPO** se tiene acceso, de forma rápida y sencilla, a toda la información del producto peligroso que se ha derramado. Esta reducción en tiempo de obtención de los datos, es de suma importancia a la hora de gestionar la toma de decisiones por parte del mando o del personal encargado en una emergencia. Además es de muy fácil ejecución para los miembros de un equipo de intervención, teniendo todos los datos de entrada y resultados en una misma pantalla.

## Consideraciones finales

El programa informático **APPO** representa un gran avance en la simulación de accidentes en los que se encuentran gases inflamables y líquidos derivados del petróleo, pero no un punto y final. Con las nuevas tecnologías existentes, el grupo de investigación de "Simulación de vertidos de hidrocarburos al mar" dirigido por el director de esta tesis, el Prof. Dr. José Ramón Bergueiro López, tiene proyectados para un futuro inmediato los siguientes desarrollos:

- Conjugar para nuestra comunidad el programa **APPO** con los mapas cartográficos e imágenes satélite que facilitan los visualizadores: IDEIB (Infraestructura de Dades Espacials de les Illes Balears), Google Maps y Google Earth.
- Adaptar la actual arquitectura del programa a nuevas plataformas permitiendo su ejecución en otros dispositivos ("tablet", "Smartphone", etc.).
- Conexión on-line con el Centre Meteorològic Territorial de les Illes Balears a efectos de que las nuevas versiones de **APPO** obtengan los datos meteorológicos (temperatura ambiente, humedad del aire, velocidad del viento, etc.) de forma inmediata.





## Bibliografía







## BIBLIOGRAFIA

- [ADR, 1999] ADR 1999. Acuerdo europeo sobre transporte internacional de mercancías peligrosas por carretera. Ministerio de Fomento, 1999
- [ADR, 2007] ADR 2007. Acuerdo europeo sobre transporte internacional de mercancías peligrosas por carretera. Ministerio de Fomento.
- [AICHE, 1989] A.I.Ch.E. Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis. Nueva York, A.I.Ch.E., (1989)
- [Alger, 1979] R.S. Alger, R.C. Corlett, A.S. Gordon, and F.A. Williams (1979), Some aspects of Turbulent Pool Fires, J. Fire Tech., 15, 2, pp. 142-156.
- [Baker, 1973] Baker, W.E. "Explosions in air", University of Texas Press, Austin, Texas, 1973
- [Baker, 1983] Baker, W.E., Cox P.A., Westine P.S., Kulesz J.J., Strehlow R.A. "Explosion hazards and evaluation" Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam – Oxford – New York, (1983).
- [Bartknecht, 1981] Bartknecht. Explosions. Berlin Springer-Verlag, (1981)
- [Bergueiro, 1991] Bergueiro J.R., Dominguez F. Contaminación del mar por petróleo. Govern Balear, Conselleria d'Obres Públiques i Ordenació del Territori, Direcció General del Medi Ambient, (1991)
- [Blackshear, 1974] Blackshear, Ed. Heat Transfer in Fires – Thermophysics, Social Aspects, Economic Impacts. John Wiley & Sons, (1974).
- [Bodurtha, 1980] Bodurtha, F. T. Industrial Explosion Prevention and Protection. New York, McGraw Hill Book Company, (1980), 167 págs.
- [Branan, 2000] Branan C.R., Soluciones prácticas para el Ingeniero Químico. Segunda edición. Mc Graw-Hill. Abril (2000).
- [Bryan, 1982] Bryan, J.L. Fire suppression and detection systems. New York, Mac Millan Publishing Co., Inc., (1982)



- [Brzustowski, 1973] Brzustowski TA, A New Criterion for the Length of a Gaseous Diffusion Flame. Comb Sci. & Tech., Vol 6, pp. 313-319 (1973)
- [Burgess, 1961] Burgess, D S, A Strasser, and J Grumer, Diffusive Burning of Liquid Fuel in Open Trays, the Fire Research Abs. & Review, 3, p. 177. (1961).
- [Cano, 2000] Cano F.J., Hernando J. Nueva reglamentación de accidentes graves (R.D. 1254/99) Química e Industria, nº 509, pag 312-320 (mayo 2000)
- [Cartwright, 1995] Cartwright, P. Industrial explosion protection. Dust explosion protection seminar (22-8-1995) Oldham. Lancashire, Kidde Fire Protection -Chilworth Technology Ltd.
- [CIEMAT, 1990] Metodologías de análisis de riesgos. Volúmenes I y II. CIEMAT-Dirección General de Protección Civil. Madrid, (1990).
- [Colebrook, 1939] Colebrook C.F., Friction factors for pipe flow, Inst. Civil Eng. 11, 133 (1939)
- [Costa Novella, 1985] Costa Novella, E. Ingeniería Química, tomo 3. Flujo de Fluidos. Ed. Alhambra, (1985)
- [Coulson, 1990] Coulson, J.M. y Richardson, J.F. Chemical Engineering (Vol. 1). Oxford, Pergamon Press, (1990), 6 vols.
- [Crane, 1982] Crane Co., Technical Paper, 410, New York (1982)
- [Crocker, 1988] Crocker WP, and DH Naiper. "Mathematical Models for the Prediction of Thermal Radiation From Jets Fires" I Chem. Symposium Series No. 110:331-347, (1988)
- [Devitt, 1990] MC Devitt, C.A. et al. Initiation stop of Boiling Liquid Expanding Vapour Explosions. Journal of Hazardous Materials, (1990), 25, págs 169 – 180.
- [Diaz, 1972] Diaz M., Roig A. Química Física, tomo II. Ed. Alhambra Universidad 1972
- [Eckhoff, 1991] Eckhoff, R.K. Dust explosions in the process industries. London, Butterworth-Heinemann, 1991
- [Eisenberg, 1975] Eisenberg, NA. et al. Vulnerability Model. A Simulation System for Assessing Damage Resulting from Marine Spills. Springfield, VA, U.S.A., U. S. Coast Guard, Office of Research and Development, Report No. CG-D- 136- 75, NTIS. AD-AO15-245, (1975)
- [Fauske, 1987] Fauske HK and M Epstein "Source Term Consideration in Connection with Chemical Accidents and Vapor Cloud Modeling". International Conference on Vapor Cloud Modeling (New York: American Institute of Chemical Engineers), (1987).



- [Fay, 1969] Fay, J.A. The spread of oil on a calm sea. In: Oil on the sea, Hovet (Ed.). Plenum Press, NT, pp 53-63, (1969)
- [Fernández, 1990] Fernández Cámara, A. Explosión de recipientes. Teoría y cálculo de las consecuencias de la radiación térmica. Prevención, (1990), nº 114 Octubre - Diciembre, págs. 48 - 56
- [Fleischer, 1980] Fleischer, M. T. An evaporation / Air Dispersion model for Chemical Spills on Land. Shell Development Company, Houston, Texas, (1980)
- [Frak, 1995] Frak P. Lees. Loss prevention in the process industries. Volúmenes 1, 2 y 3. Segunda edición. Ed. Butterworth-Heinemann, (1995).
- [Frutos, 2001] Frutos, M. Utilización de gases industriales en la Industria Petroquímica y Química Final. Química e Industria, núm. 519. Pág. 42-43. (abril 2001).
- [Gary, 1980] Gary, G.E., Refino del petróleo. G E Handwork. Ed. Reverté (1980).
- GCPQRA 1989] American Institute of Chemical Engineers. Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis. New York, AIChE, (1989), pág. 585.
- [Giles, 1969] Giles, R.V. Mecánica de los Fluidos e Hidráulica. Nueva York, Mc Graw-Hill, (1969).
- [GTM, 1994] Guías Técnicas. Métodos cualitativos y cuantitativos para el Análisis de Riesgos. Dirección General de Protección Civil. Ministerio del Interior. Diciembre 1994, Madrid.
- [Green book, 1992] Methods for the determination of possible damage to people and objects from releases of hazardous materials. CPR 16E. The Green Book, TNO. (1992).
- [GTPC, 1988] Guía para la elaboración de estudios de seguridad. Guía técnica. Dirección General de Protección Civil. Madrid, 1988.
- [GTPC, 1994] Guía técnica. Metodologías para el análisis de riesgos. Visión general. Dirección General de Protección Civil. Madrid, (1994).
- [Huggland, 1976] Huggland B. and Pearson L. The heat radiation from petroleum fires, FOA Rapport, Forsvarets Forskningsanstalt, Stockholm (1976).
- [Kumar, 1999] A Kumar, S Vashisth: "Software for Emission Rate Modeling of Accidental Toxic Releases", American Academy of Environmental Engineers, (1999).
- [Lees, 1980] Lees, F P. Loss prevention in the process industries. Londres, Butterworths, (1980), 2 vols. 1316 págs.



- [Leslie, 1991] Leslie, IRM Birk, A.M. State of the art review of pressure liquefied gas container failure modes and associated projectile hazards. *Journal of Hazardous Materials*, (1991), 28, págs 329 - 365
- [Levenspiel, 1993] Levenspiel O. Flujo de fluidos e intercambio de calor. Ed. Reverté S.A., (1993).
- [Ley 31/1995] Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales.
- [López, 2000] López F., Terminales independientes de líquidos al servicio de la industria química. *Química e Industria*, num 507, pag 29-32 (marzo 2000).
- [Mans, 1985] Mans, C. La explosión del camping "Els Alfacs". *Ingeniería Química*, noviembre, pag. 349-351 (1985).
- [MAPFRE, 1991] Manual de higiene industrial. Fundación MAPFRE, (1991).
- [MIE-APQ-005/92] Orden de 21 de julio de 1992 por la que se aprueba la Instrucción Técnica Complementaria MIE-APQ-005 del Reglamento de Almacenamiento de botellas y botellones de gases comprimidos, licuados y disueltos a presión. (B.O.E. núm. 192 de 14 de agosto de 1992).
- [Montenegro, 1987] Montenegro Formiguera, L. Las explosiones BLEVE y el gas natural licuado. Comunicación 14-87. XIII Asamblea Nacional del Gas. Madrid, 27, 28 y 29 mayo (1987).
- [Moorhouse, 1982] Moorhouse, J and Pritchard. "Thermal Radiation Hazards from Large Pool Fires and Fireballs – A Literature Review". *The Assessment of Major Hazards Symposium*, Manchester, England, (1982).
- [MSPQP, 1998] Manual de seguridad industrial en plantas químicas y petroleras. J. M. Storch de Gracia. McGraw Hill, (1998).
- [Multon, 1988] Multon, J.L., Aditivos y auxiliares de fabricación en las Industrias Agroalimentarias. Ed. Acribia, (1988).
- [Murria, 1970] Murria R., Spiegel Ph.D. Manual de fórmulas y tablas matemáticas. Schaum-McGraw-Hill. (1970).
- [Nazario, 1988] Nazario, F.N. Preventing or surviving explosions. *Chemical Engineering*, (1988), pags. 102-109.
- [NTP 209] Diaz Moreno, L. NTP 209: Botellas de G.L.P.: instalación.
- [NTP 291] Turmo E. NTP 291: Modelos de vulnerabilidad de las personas por accidentes mayores: método Probit. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.



- [NTP 293] Bestraten M, Turmo E. NTP 293: Explosiones BLEVE (I): evaluación de la radiación térmica. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- [NTP 294] Bestraten M, Turmo E. NTP 294: Explosiones BLEVE (II): medidas preventivas. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- [NTP 321] Turno E. NTP 321: Explosiones de nubes de vapor no confinadas: evaluación de la sobrepresión.
- [NTP 326] Turno E. NTP 326: Radiación térmica en incendios de líquidos y gases.
- [NTP 329] Turno E. NTP 329: Modelos de dispersión de gases y/o vapores en la atmósfera: fuentes puntuales continuas.
- [NTP 362] Turno E. NTP 362: Fugas en recipientes y conducciones: emisión en fase líquida.
- [NTP 385] Turno E. NTP 385: Fugas en recipientes: emisión en fase gaseosa.
- [NTP 402] Mendez B. NTP 402: Sistemas supresores de explosión (I): fundamentos teóricos y medios de extinción.
- [NTP 403] Mendez B. NTP 403: Sistemas supresores de explosión (II): factores de diseño y aplicaciones prácticas.
- [NTP 430] Turno E. NTP 430: Gases licuados: evaporación de fugas y derrames. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- [O 1974] Orden de la Presidencia del Gobierno de 29 de marzo de 1974 sobre Normas Básicas de Instalaciones de gas en Edificios Habitados (BOE núm. 77 de 30 de marzo de **1974**).
- [O 3467/82] Orden 3467 de 9 de marzo de 1982 (Ministerio de Industria y Energía) Productos Químicos. Norma Técnica Complementaria MIE-APQ-001. "Almacenamiento de líquidos inflamables y combustibles".
- [O 19650/92] Orden 19650 de 21 de julio de 1992 por la que se aprueba la Instrucción Técnica Complementaria MIE-APQ-005 del Reglamento de Almacenamiento de Productos Químicos, referente a almacenamiento de botellas y botellones de gases comprimidos, licuados y disueltos a presión.
- [Perry, 1950] Perry J.H., Chemical Engineer's Handbook, Third Ed., Mc Graw-Hill, New York (**1950**).
- [PESQ 1991] MINISTERIO DEL INTERIOR. Directriz Básica para la elaboración y homologación de los Planes Especiales del Sector Químico. BOE 6-2-1991.



- [PLASECTOR 99] PLASEQTOR La resposta al risc químic a l'àrea de La Tordera. Generalitat de Catalunya. Departament de Governació. Direcció General d'Emergències i Seguretat Civil. (1999).
- [RD 668/80] Real Decreto 668/80 (M<sup>o</sup> Industria y Energía) Productos químicos. Almacenamiento. (BOE núm. 90 de 14 de abril de 1980).
- [RD 2216/85] Real Decreto 2216/85 (Presidencia) Productos químicos. Reglamento sobre declaración de sustancias nuevas y clasificación, envasado y etiquetado de sustancias peligrosas. (BOE núm. 111 de 9 de mayo de 1986).
- [RD 1078/1993] Real Decreto 1078/1993, de 2 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre clasificación, envasado y etiquetado de preparados peligrosos (BOE núm. 216 de 9 de septiembre de 1993).
- [RD 664/1997] Real Decreto 664/1997, de 12 de mayo, sobre la protección de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a agentes biológicos durante el trabajo.
- [RD 665/1997] Real Decreto 665/1997, de 12 de mayo, sobre la protección de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a agentes cancerígenos durante el trabajo.
- [Roberts, 1982] Roberts, AF "The effects of Conditions Prior to Loss of Containment on Fireball Behaviour" The Assessment of Major Hazards Symposium, Manchester, England, (1982).
- [Romano, 1985] Romano, A., Piccinini, N., y G.C. Bello. Evaluación de las consecuencias de incendios, explosiones y escapes de sustancias tóxicas en plantas industriales. Ingeniería Química, Vol. 17, n<sup>o</sup> 200, Noviembre (1985).
- [Santamaría, 1994] Santamaría, J.M. Baña, P.A. Análisis y reducción de riesgos en la industria química. Madrid, Editorial MAPFRE, (1994).
- [Sax, 1974] Sax, N. I. Industrial Pollution. New York, Van Nostrand Reinhold Company, (1974), pág. 702.
- [Schlichting, 1979] Schlichting H., Boundary Layer Theory, Seventh ed. (transl. By J. Kestin), Mc Graw-Hill, New York (1979).
- [Schofiels, 1988] Schofiels, C. Abbott, J. A. Guide to dust explosion prevention and protection. Part 2-Ignition prevention, containment, inerting, suppression and isolation Rugby, The Institution of Chemical Engineers, (1988).





- [Sigalés, 1990] Sigalés B. Trujillo, A. Modelado de estallidos de recipientes. Modelado fenomenológico de estallidos de recipientes conteniendo líquidos a presión, debidas a calentamiento exterior por llamas. Ingeniería Química, (1990), Octubre pags, 465 – 473.
- [Stinton, 1979] Stinton, H. Risks of transporting hazardous materials spelled out by BLEVE Fire, (1979), Noviembre, págs 313 – 315.
- [Thomas, 1963] Thomas, P.H. The size of flames from natural fires, 9 th International combustion symposium; pp. 844-859 (1963).
- [TNO, 1979] TNO. Methods for the calculation of the physical effects of the escape of dangerous material (Liquids and gases) (1ª Edición) Voorburg (Holanda), Directorate-General of Labour, Ministry of Social Affairs, (1979).
- [TNO, 1992] TNO. Methods for the calculation of physical effects resulting from releases of hazardous materials (liquids and gases). 2nd ed. Voorburg, The Netherlands, TNO, (1992).
- [TPC/ADR 1997] Manual para conductores de cisternas que transportan materias peligrosas reguladas por TPC/ADR. Carbuos Metálicos, S.A. – división industrial, 1997.
- [Voorburg, 1992] Voorburg (Holanda), Directorate-General of Labour, Ministry of Social affairs and Employment, (1992).
- [Walls, 1979] Walls W.L. The BLEVE, part I and II. Fire Command, 46 (5), 1979, págs 22-24; y 46(6), (1979), págs 35-37.
- [Wang, 1975] Wang, H. Campbell, J.R. and Ditmars, J.D. computer modeling of oil drift and spanding in delaware bay. Ocean engineering, university of delaware, (1975).
- [Yellow book, 1997] Methods for the calculation of the physical effects of the escape of dangerous material (Liquids and gases). Parts I and II. CPR 14E. The Yellow Book, TNO. (1997).
- [Zabetakis, 1964] Zabetakis, M.G. “Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors” Bull N° 627. Bureau of Mines, Pittsburgh, Pennsylvania, (1964).
- [Zabetakis, 1967] Zabetakis, M.G. “Safety with Cryogenic Fluids” Plenum Press, (1967).

