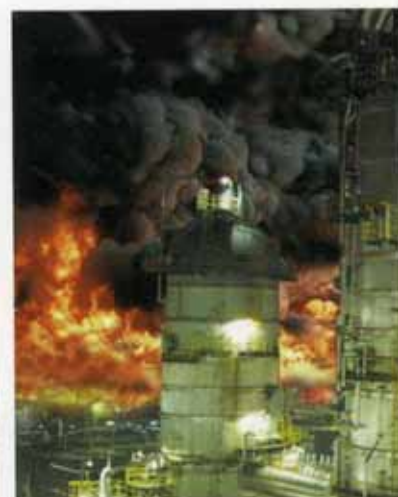




guía técnica

ZONAS DE PLANIFICACIÓN PARA ACCIDENTES GRAVES DE TIPO TÉRMICO

(en el ámbito del Real Decreto 1254/99 [Seveso II])



Dirección General
de Protección Civil

Índice general

Presentación	11
Prólogo	13
Capítulo 1. Introducción	15
1.1. Los incendios en la industria química	15
1.2. Referencias bibliográficas	18
Capítulo 2. Tipología de los incendios	19
2.1. Incendios en charco o depósito	19
2.1.1. Desarrollo del incendio	19
2.1.2. Factores que influyen en la radiación térmica	21
2.1.2.1. Mecanismos de la evaporación durante el incendio	21
2.1.2.2. Geometría de la llama	22
2.2. Bolas de fuego	23
2.2.1. Definiciones de BLEVE y bola de fuego	24
2.2.2. Formación de la nube de vapor	25
2.2.3. Desarrollo de la bola de fuego	26
2.2.4. Factores que influyen en la radiación térmica	28
2.2.5. Propiedades características de las bolas de fuego	28
2.3. Dardos de fuego	29
2.3.1. Definición	29
2.3.2. Formación y desarrollo del dardo de fuego	29
2.3.3. Factores que influyen en la radiación térmica	30
2.4. Incendios flash	31
2.5. Referencias bibliográficas	32

Capítulo 3. Efectos de la radiación térmica	35
3.1. Efectos sobre las personas	35
3.1.1. Quemaduras de primer grado: Tipología y valores umbral	36
3.1.2. Quemaduras de segundo grado: Tipología y valores umbral	39
3.1.3. Quemaduras de tercer grado: Tipología y valores umbral	41
3.1.4. Factores que condicionan la mortalidad por quemaduras de segundo y tercer grado	42
3.2. Efectos sobre los materiales	44
3.2.1. El concepto de dosis de radiación térmica aplicado a los materiales	44
3.2.2. Intensidad crítica de radiación	45
3.3. Referencias bibliográficas	47
Capítulo 4. Modelos de cálculo de la intensidad y de la dosis de radiación térmica .	49
4.1. El modelo de fuente puntual (MFP)	49
4.1.1. La potencia total generada en los incendios	50
4.1.1.1. Incendios en charco o depósito	51
4.1.1.2. Bolas de fuego	52
4.1.1.3. Dardos de fuego	52
4.1.2. Coeficiente de transmisividad atmosférica	54
4.2. El modelo de llama sólida (MLLS)	56
4.2.1. Factores de visión	57
4.2.1.1. Incendios en charco o depósito	58
4.2.1.2. Bolas de fuego	62
4.2.1.3. Dardos de fuego	63
4.2.2. La potencia de emisión de la radiación térmica	66
4.2.2.1. Incendios en charco o depósito	67
4.2.2.2. Bolas de fuego	69
4.2.2.3. Dardos de fuego	70
4.3. Dosis de radiación térmica	70
4.3.1. Propuesta para determinar las dosis de radiación térmica	72
4.4. Referencias bibliográficas	74
Capítulo 5. Valores límite para establecer las zonas de planificación en los accidentes de tipo térmico	77
5.1. Referencia normativa	79

Capítulo 6. Ejemplos de cálculo de zonas de planificación	81
6.1. El programa EFFECTS 4	81
6.1.1. Incendios en charco	82
6.1.2. Bolas de fuego	83
6.1.3. Dardos de fuego	85
6.2. Ejemplos de cálculo para incendios en charco	86
6.2.1. Descripción de los escenarios accidentales	86
6.2.2. Datos de entrada al programa EFFECTS 4	86
6.2.3. Resultados proporcionados por el programa EFFECTS 4	87
6.2.4. Tratamiento de los resultados	88
6.2.5. Zonas de planificación	89
6.3. Ejemplos de cálculo para bolas de fuego	90
6.3.1. Descripción de los escenarios accidentales	90
6.3.2. Datos de entrada al programa EFFECTS 4	90
6.3.3. Resultados proporcionados por el programa EFFECTS 4	91
6.3.4. Tratamiento de los resultados	92
6.3.5. Zonas de planificación	93
6.3.6. Validación del procedimiento para determinar la dosis de radiación térmica para bolas de fuego	94
6.4. Ejemplos de cálculo para dardos de fuego	96
6.4.1. Descripción de los escenarios accidentales	96
6.4.2. Datos de entrada al programa EFFECTS 4	97
6.4.3. Resultados proporcionados por el programa EFFECTS 4	97
6.4.4. Tratamiento de los resultados	98
6.4.5. Zonas de planificación	99
6.5. Referencia	100
Capítulo 7. Nomenclatura	101
Índice de Tablas	105
Índice de Figuras	107
Anexo. La función PROBIT aplicada a los accidentes de tipo térmico	109
I.1. Referencias bibliográficas	111

Presentación

La Dirección General de Protección Civil, a través del Ministerio del Interior, tiene asumidas las funciones que, como Autoridad Competente, le corresponden a nivel nacional y ante la Unión Europea, para la transposición, aplicación y seguimiento de la Directiva del Consejo 96/82/CE, de 9 de diciembre (Directiva Seveso II), relativa al control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas.

La promulgación de esta Directiva supuso respecto a la anterior legislación –Directiva 82/501/CE y sus modificaciones (Directiva Seveso I)– la incorporación de nuevos criterios que afectan entre otros a la definición del ámbito de aplicación, a los requisitos que ha de cumplir el industrial titular del establecimiento afectado, como la definición de la política de prevención de accidentes graves, el desarrollo de un sistema de gestión de seguridad que describa los elementos puestos en juego para aplicar dicha política, la valoración del efecto dominó entre establecimientos próximos, etc.

La transposición de la Directiva Seveso II a nuestro ordenamiento legal se llevó a cabo mediante el Real Decreto 1254/1999, de 16 de julio, y recientemente, tras un proceso de consultas en el que han participado las partes implicadas –autoridades estatales y autonómicas, representantes de la industria química, técnicos y personal especializado–, se ha elaborado la Directriz Básica de Protección Civil para el Control y Planificación ante el Riesgo de Accidentes Graves en los que Intervienen Sustancias Peligrosas. Este documento constituye la herramienta técnica para la aplicación del Real Decreto citado, cuyo objeto primordial es la prevención de los accidentes graves y la limitación de sus consecuencias para el hombre, el medio ambiente y los bienes. Para alcanzar esta finalidad, se estructura en el marco de competencias de las Comunidades Autónomas el desarrollo de planes de emergencia exterior para los establecimientos afectados, debiendo tener en cuenta la ubicación de dichos establecimientos en sus políticas de asignación de suelo, realizar labores de inspección, organizar la información a la población, etc.

Ciertos elementos contemplados en el Real Decreto citado necesitan un desarrollo más pormenorizado que el recogido en la propia Directriz Básica. La complejidad, extensión o justificación de aspectos tales como la tipología de los accidentes y las magnitudes que definen los fenómenos peligrosos, los análisis de consecuencias y los índices utilizados para establecer las zonas de planificación, el efecto dominó, etc., demandan por parte de las administraciones competentes, criterios principalmente técnicos, de carácter homogéneo.

Por ello, la Dirección General de Protección Civil ha entendido necesario elaborar guías de carácter técnico y recominatorio, dirigidas a establecer criterios que permitan interpretar y desarrollar determinados requisitos de la Directriz Básica.

La elaboración de estas guías precisa de información actualizada sobre aspectos técnicos y científicos que, en una actividad de gran complejidad, como es la industria química, donde se incorporan continuamente nuevas tecnologías y sustancias, requiere de rigor y calidad. Por ello, la Dirección General de Protección Civil cuenta con la labor asesora del Grupo de Investigación de Seguridad e Higiene en la Industria del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Murcia.

Ambas instituciones vienen colaborando en temas relativos a la prevención y a la protección frente a los riesgos de accidentes asociados a la industria química. Como consecuencia de ello, el Grupo de Investigación ha realizado diversos informes y trabajos entre los que destaca el programa informático "AIDA" para la ayuda a la interpretación y aplicación del Anexo I del Real Decreto 1254/1999, de libre acceso a través de Internet.

Como resultado del interés por ambas partes de establecer las bases de una cooperación más intensa, se inicia una nueva etapa, en la que se desarrollarán estudios que faciliten la aplicación de los nuevos requerimientos que demanda la normativa, a través de esta serie de Guías Técnicas, elaboradas por expertos de ambas instituciones.

Nos sentiríamos plenamente satisfechos si estas publicaciones cumplen su objetivo, que no es otro que servir de ayuda a los sectores implicados o interesados en el complejo ámbito de la seguridad industrial.

Octubre, 2002

Juan San Nicolás Santamaría
Director General de Protección Civil

José Ballesta Germán
Rector de la Universidad de Murcia

Prólogo

Entre los accidentes de mayor nivel de peligrosidad que pueden manifestarse en la industria química destacan los diversos tipos de incendios que pueden surgir como consecuencia de fallos técnicos o humanos en la utilización o producción masiva de sustancias combustibles. Dichos incendios no sólo deben considerarse como un accidente aislado, sino que en muchas ocasiones tienen carácter expansivo, generando el denominado efecto dominó, cuyas consecuencias pueden ser más graves que las del incendio precursor.

En ésta Guía se describe la tipología de los grandes incendios exteriores en la mencionada actividad, los efectos sobre los seres vivos y los materiales, definiendo las magnitudes peligrosas que producen daños, constituidas por la intensidad de radiación térmica y el tiempo de exposición o duración del incendio, cuya combinación define el concepto de dosis. Se excluye la descripción y valoración de otros posibles fenómenos peligrosos, como la formación de productos tóxicos, dado que, en general, la corriente térmica ascendente los aleja del suelo, disminuyendo así su impacto, salvo la persistencia de condiciones atmosféricas desfavorables que propicien el abatimiento de las emisiones, aspecto que se tratará implícitamente en otra Guía.

Además de lo anterior, se exponen los modelos de cálculo internacionalmente más aceptados para determinar las dosis de radiación y se hace un estudio completo de los valores límite propuestos para establecer las zonas de planificación en la Directriz Básica de Protección Civil para el Control y Planificación ante el Riesgo de Accidentes Graves en los que Intervienen Sustancias Peligrosas. Uno de los objetivos básicos de esta Guía es exponer una metodología para evaluar las citadas zonas en los incendios en charco, bolas de fuego y dardos de fuego. A través de diversos ejemplos y a partir de los valores de la intensidad en función de la distancia dados por el programa EFFECTS 4, de probada idoneidad para estas situaciones, se indican los criterios para determinar los perfiles de dosis que establecen el alcance de los daños.

La continuada evolución de los conocimientos en este ámbito hace que esta Guía permanezca abierta a los avances que, con seguridad, se producirán en un futuro próximo.

Finalmente, agradecemos a Antonia Garcés y a Sonia Román su valiosa colaboración en la elaboración de esta Guía.

Los autores

1.1. LOS INCENDIOS EN LA INDUSTRIA QUÍMICA

En la industria química se elaboran, utilizan o trasiegan productos inflamables –mayoritariamente derivados del petróleo– que pueden dar origen a diversos tipos de incendios. Según *Crawley (1982)* la mayor parte de ellos presentan en general una causa común: La fuga masiva e incontrolada de producto sobre el medio que rodea el depósito de almacenamiento o equipo. El desarrollo posterior del suceso depende de un amplio número de factores: estado físico (gas y/o líquido) y características del producto, velocidad con la que se produce la emisión o vertido, posibilidad inmediata o diferida de ignición, etc., pero en todo caso, y desde el punto de vista de la planificación ante accidentes graves, la radiación térmica es la manifestación más peligrosa de los incendios.

No obstante, cabe señalar que pueden producirse otros fenómenos peligrosos, como la generación de sustancias tóxicas, ondas de presión, o formación de proyectiles, estos últimos típicos de las explosiones, dado que los incendios y las explosiones químicas presentan características similares siendo su principal diferencia la velocidad de liberación de energía, mucho menor en los incendios que en las explosiones, pero en esta Guía Técnica sólo se hace referencia al daño provocado por la radiación térmica.

En la tabla 1.1 se recoge la tipología de los incendios en función del estado físico de los productos y del momento en que se aporta la energía de activación.

TABLA 1.1. Tipos de incendios

Denominación	Estado físico del producto	Ignición
Incendio en charco o depósito	Líquido	Inmediata o diferida
Bola de fuego	Gas o líquido	Inmediata
Dardo de fuego	Gas o líquido	Inmediata o diferida
Incendio flash	Gas	Diferida

Resulta ilustrativo comentar algunas estadísticas sobre los incendios acaecidos en ámbitos industriales; en este sentido *Planas (1989)* recopila datos de diferentes organismos

–*Fire Protection Association (Londres); Industrial Risk Insurers (Chicago)*– indicados en las tablas 1.2 a 1.7.

TABLA 1.2. Causas más frecuentes de la génesis de incendios de hidrocarburos

Causa del incendio	Frecuencia (%)
Derrame y escape de líquido o gas inflamable	17.5
Sobrecalentamiento, superficies calientes, etc.	15.6
Fallos de tuberías y accesorios	11.1
Averías eléctricas	11.1
Cortes y soldaduras	11.1
Provocados	4.9
Otras	28.7

De estos datos se deduce que las causas más frecuentes de los incendios implican la fuga de sustancias inflamables, que incluyendo los ocurridos por fallos de tuberías y accesorios alcanzan el 28.6% en total.

TABLA 1.3. Localización de los incendios

Localización del incendio	Frecuencia (%)
Edificios de fabricación o procesos cerrados	42.2
Estructuras al aire libre	33.3
Almacenes	6.7
Otros	17.8

TABLA 1.4. Origen de grandes incendios en industrias químicas y petroleras

Enclave o equipo	Frecuencia, (%)
Almacenamiento:	42.0
Almacén o lugar abierto	27.0
Tanques	15.0
Equipos:	31.0
Tuberías	19.0
Reactor o mezclador	5.0
Secadero de vapor	2.5
Cabinas de pulverización y vaporización	1.0
Torres de refrigeración	1.0
Sin especificar	2.5
Accesorios:	16.0
Acoplamientos, collarines, juntas	8.0
Equipos eléctricos	8.0
Sin especificar:	11.0

Se observa que el 73 % de los incendios tiene su origen en depósitos de almacenamiento y equipos.

TABLA 1.5. Tipos de energías causantes de la ignición

Tipología	Frecuencia, (%)
Calor procedente de objetos calientes	29.1
Arco o sobrecarga eléctrica	21.0
Calor procedente de los objetos activados por combustibles	19.0
Calor de origen natural	11.0
Fuegos abiertos o chispas	10.4
Procedente de la acción de fumar	4.2
Calor procedente de fuego exterior	2.8
Explosivos o fuegos artificiales	2.2
Otras formas	2.3

Principalmente intervienen cuatro tipos de fuentes de energía: objetos calientes, electricidad, objetos activados por combustibles y origen natural.

TABLA 1.6. Productos involucrados

Producto incendiado inicialmente	Frecuencia (%)
Según el estado físico	
Gas	13.0
Vapor	20.0
Líquido	25.0
Sólido	29.0
Desconocido	13.0
Según el tipo de producto	
<i>Hidrocarburos:</i>	29.5
Gas	4.0
Líquido/vapor	23.0
Sólido	2.5
<i>Otros productos orgánicos:</i>	29.0
Líquido/vapor	20.0
Sólido	9.0
<i>Otros productos:</i>	41.5
Sólidos celulósicos	8.0
Hidrógeno	9.0
Azufre	1.0
Desconocido	23.5

Los productos relacionados con el petróleo, sus derivados y otras sustancias orgánicas intervienen en el 60% de los casos. Según *Garrison (1986)*, en una revisión que abarca un

periodo de treinta años, los GLP se han visto implicados en el 30% de los accidentes ocurridos en industrias químicas que procesan o almacenan hidrocarburos.

TABLA 1.7. Factores que contribuyen a agravar los daños producidos por un incendio en instalaciones de proceso químico

Factores	Frecuencia (%)
Ausencia de sistemas de protección	35.6
Fallos humanos	15.6
Presencia de otros líquidos inflamables	11.1
Rotura de otros recipientes	8.9
Acumulación de residuos	8.9
Sistema de protección inadecuado o deteriorado	6.7
Otros	13.2

De los factores anteriores se destacan la ausencia o inadecuado sistema de protección –más del 40%– y el fallo humano.

1.2. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Crawley, F.K.; (1982). *The effects of the ignition of a major fuel spillage*. I. Chem. E. Symposium Series, **71**, The Assessment of Major Hazards Symposium, 125-145.
- Garrison, W.G.; (1986). *One hundred largest losses-A Thirty-year review of property damage losses in the hydrocarbon-chemical industries. Ninth Edition*. M & M Protection Consultant, Chicago.
- Planas, G.; (1989). *La prevención de incendios y explosiones en las instalaciones industriales*. Ingeniería Química, 141-155.

2.1. INCENDIOS EN CHARCO O DEPÓSITO

Cuando un combustible líquido arde, lo que realmente se quema es la parte que se evapora desde la superficie del mismo, sobre la que se apoya la base de las llamas; esto es, los vapores emitidos se mezclan con el aire y cuando se sobrepasa el límite inferior de inflamabilidad y se aporta la energía de activación necesaria, se produce el incendio. Si está precedido por una fuga o derrame, el líquido se extiende, ocupando una superficie que depende de la existencia de cubeto u obstáculos que impidan su progresión. El incendio también puede tener lugar inicialmente en el propio contenedor o depósito, pero en muchas ocasiones se produce la rotura del equipo produciendo la formación del charco.

Es habitual clasificar el fenómeno descrito como incendio en pared (*wall fire*) o incendio en charco (*pool fire*) –Joulain, 1996– según que la base del incendio sea alargada o pueda aproximarse a círculos, cuadrados o paralelepípedos con lados no muy diferentes, si bien, como indica *Fernández Pello (1991)*, esta clasificación resulta arbitraria en un buen número de casos –por ello, aquí se generalizan estos accidentes como incendios en charco–.

2.1.1. Desarrollo del incendio

El desarrollo del incendio puede presentar diferencias según que se produzca en charco –confinado o no–, o en un depósito. Cada uno de ellos conlleva, en general, las siguientes etapas:

Incendio en charco

1ª Etapa: Iniciación. Por sobrellenado o rotura del tanque, de una conexión, de una tubería, etc. Las causas pueden ser variadas, por ejemplo, fallo de los sistemas de control, impacto exterior, fisura provocada por fallo de soldadura, fatiga del material, etc.

2ª Etapa: Fuga del contenido. Vertido del producto sobre el área circundante, limitada o no –por un cubeto o por la topografía del terreno–. La temperatura del líquido debe

mediante los cuales el producto se incorpora a la fase vapor y la velocidad con la que lo hace, distinguiéndose:

- a) La evaporación normal del líquido debido a su presión de vapor.
- b) La evaporación *forzada*, como consecuencia del calor transferido desde las llamas a la superficie del líquido.

La contribución de cada uno ellos al total evaporado es función de la fase en la que se encuentre el incendio. Así, cuando alcanza su pleno desarrollo la contribución del segundo mecanismo es determinante, suponiendo en algunos casos el 80% del total del producto evaporado. Sin embargo, en los instantes iniciales, el primer mecanismo tiene un papel importante, sobre todo en incendios de sustancias cuya temperatura de ebullición es inferior a la ambiental. Por ello, se distinguen dos situaciones:

- a) Si el producto derramado tiene un punto de ebullición inferior a la temperatura ambiente (gas licuado), se produce una vaporización súbita que facilita la formación de la mezcla inflamable combustible-aire.
- b) Para productos líquidos, el incendio se puede producir si sus puntos de inflamación son inferiores a la temperatura ambiente; si son superiores no se produce.

2.1.2.2. Geometría de la llama

La geometría de la llama es otro aspecto relevante para estimar la emisión superficial de la radiación térmica. Para definirla se recurre a diferentes modelos, siendo el más simple aquel que considera la llama concentrada en un punto. Otros modelos se apoyan en una descripción más realista, a través de geometrías sencillas, tales como cilindros o laminas. De éstas, la cilíndrica es la más utilizada, siendo las magnitudes importantes el diámetro –igual al del charco o tanque– y la altura de la llama –coincidente con la zona visible de la misma–, tal y como se representa en la figura 2.1.

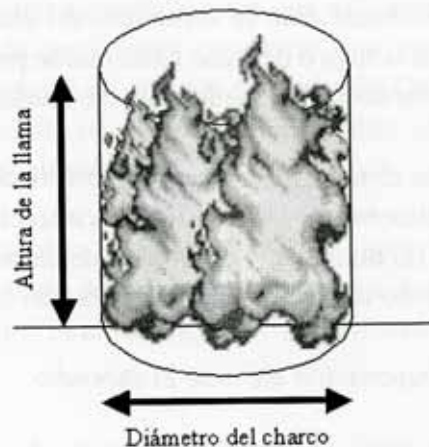


FIGURA 2.1. Representación esquemática de un incendio en charco modelizado con forma cilíndrica.

Para estimar el diámetro del charco se debe tener en cuenta si está confinado o no. En aquellos delimitados por cubetos, se dispone del diámetro real –geometría circular– o su equivalente –geometría cuadrada o rectangular–. Sin embargo, si no existe cubeto, el área total implicada no está siempre claramente definida, sobre todo si la fuga se produce sobre un terreno sin obstáculos que no permita contener el derrame, si bien se puede utilizar el valor máximo de la superficie que puede cubrir el líquido derramado. El diámetro máximo alcanzado por el charco es función, además del tipo de escenario, del caudal o cantidad total fugada y de la velocidad de evaporación. En este sentido *Mudan (1984)* clasifica las posibilidades en tres categorías dependientes del caudal y la duración del derrame:

- a) Continuos: Cuando el caudal de fuga es aproximadamente constante durante dilatados períodos.
- b) Instantáneos: Si el derrame ocurre en un corto periodo de tiempo.
- c) Discontinuos: Si el caudal de fuga varía ostensiblemente con el tiempo.

Este último caso se suele incluir en alguno de los anteriores, aunque, a veces, se plantean dificultades para decidir la calificación.

Para **derrames continuos** el líquido se extenderá, ampliando la zona del incendio, hasta que la velocidad de fuga se iguale a la velocidad de evaporación. Esta condición permite calcular el diámetro máximo alcanzado. En el caso de **derrames instantáneos** se alcanza el diámetro máximo rápidamente para ir decreciendo con el tiempo, hasta que todo el producto se haya consumido.

En general, las expresiones disponibles en la bibliografía para determinar la extensión del derrame proporcionan diámetros máximos que en realidad sólo se mantienen durante periodos cortos; por ello, a efectos de estimación del área afectada, se recurre al uso de valores promedio, con lo cual se consigue una aproximación más realista. Un inconveniente de la mayor parte de dichas expresiones es que han sido deducidas para terrenos impermeables y planos.

Otro factor a tener en cuenta es la acción que el viento produce sobre la geometría de las llamas, que se materializa en dos efectos: El ensanchamiento de la base del incendio en la dirección del viento y la inclinación de las llamas.

2.2. BOLAS DE FUEGO

En numerosas instalaciones industriales es común el almacenamiento de gases bajo presión con el fin de mantenerlos en estado líquido, disminuyendo el volumen del contenedor requerido.

En estas condiciones existe un riesgo potencial de accidente debido a un posible escape del contenido provocado por la rotura parcial o total de los contenedores –Prugh (1991a y b) ha recopilado accidentes acaecidos entre los años 1926 y 1986–. Cuando los gases son inflamables, el escape puede ir seguido de su posterior ignición, produciéndose la **bola de fuego**. Un caso particular del mismo, especialmente grave, es el denominado **BLEVE** seguido de **bola de fuego**, conceptos que conviene definir.

2.2.1. Definiciones de BLEVE y bola de fuego

Estos fenómenos suelen aparecer asociados (Winder y cols, 1992; Melhem y Croce, 1993), si bien cabe reseñar que bola de fuego y BLEVE son fenómenos distintos. Esto queda reflejado en la definición inicial para BLEVE propuesta por Wall (1978) –término que utilizó para describir el daño producido por la explosión sufrida por un reactor de una planta química debido a una sobrepresión– y la ofrecida por la NFPA (1986), utilizada por otros autores –Kletz (1977), Lees (1980), Prugh (1991a, 1991b) o McDevitt (1992)–: “BLEVE, acrónimo inglés correspondiente a **Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion**, supone la rotura catastrófica de un contenedor que almacena un gas licuado por encima de su punto de ebullición a la presión atmosférica, produciendo la fuga instantánea y masiva de dicho líquido a la atmósfera. El rápido descenso de la presión a que se ve sometido el producto fugado en el momento de la rotura, provoca un flash explosivo de una parte del líquido que forma una nube de vapor –mezcla de aire y material fugado–. Si el producto es inflamable y encuentra un punto de ignición puede producirse la combustión de la mezcla, dando lugar al segundo fenómeno peligroso, esto es, la bola de fuego –fireball–. Este último fenómeno se puede producir, también, a partir de una nube no confinada de vapor inflamable, sin ser precedido por una BLEVE.”

Los productos que han provocado bolas de fuego –incluyendo las BLEVE’s seguidas de bola de fuego– han sido generalmente gases licuados almacenados bajo presión, como GLP –propano y butano–, productos de síntesis –etileno, propileno, cloruro de vinilo, etc.–, y, en menor medida, el gas natural.

Cabe añadir que la cantidad de sustancia involucrada en una bola de fuego es función de la magnitud de la evaporación inicial de producto fugado. Según Johnson y Pritchard (1990) se puede estimar la cantidad implicada en el flash inicial a partir de datos relacionados con las condiciones de la fuga y la propiedades termodinámicas de la sustancia fugada, fijando el límite del 35%, por encima del cual la totalidad de la masa participa en la bola de fuego, no produciéndose incendio en charco. Un criterio similar ha sido utilizado anteriormente por Hasegawa y Sato (1977), quienes observan experimentalmente que cuando el flash inicial es igual o superior al 36% del total, el incendio desarrollado es una bola de fuego, mientras que si el flash es inferior al 20% se produce un incendio en charco. En el intervalo comprendido entre ambos valores, pueden producirse los dos tipos de incendios.

2.2.2. Formación de la nube de vapor

La formación y evolución de la nube de vapor o gas inflamable es decisiva en la generación y desarrollo posterior de la bola de fuego.

El mecanismo de formación de la nube de gas inflamable ha sido descrito mediante dos modelos. El primero, propuesto por *Hardee y Lee (1975)*, está basado en la conservación de la cantidad de movimiento inicial de la fuga y el segundo, propuesto por *Maurer (1977)*, está condicionado por un proceso de difusión turbulenta.

El primer modelo parte de la hipótesis siguiente: Rotura de un contenedor que almacena un gas licuado a temperatura por encima de su punto de ebullición; evaporación súbita que conlleva la expansión rápida de una mezcla de vapor y líquido en forma de aerosol; mezcla con el aire circundante en ausencia de focos de ignición. Se supone la formación inicial de una nube hemisférica, situada a nivel del suelo. Aplicando el principio de conservación de la cantidad de movimiento se obtienen relaciones para el tamaño de la nube en función del tiempo y para el caudal de descarga. Asimismo, determinan el tiempo transcurrido desde la fuga para que la concentración media de la nube se encuentre por debajo del límite inferior de inflamabilidad, obteniendo valores muy pequeños –pocos segundos–.

El modelo de *Maurer (1977)* describe mejor el proceso de mezcla en la nube. Se trata de un tratamiento teórico en el que inicialmente se parte de un núcleo central de concentración homogénea rodeado por una región donde la concentración desciende con la distancia siguiendo un modelo gaussiano. Este núcleo se rompe en diferentes fragmentos que se desplazan rápidamente, expandiendo la nube y por tanto aumentando su volumen. Esta expansión provoca la entrada de aire y la aparición de zonas heterogéneas formadas por combustible puro, mezclas combustible/aire y aire sin mezclar, cuyos volúmenes y concentraciones varían continuamente con el tiempo. Este modelo permite el cálculo de la distribución de concentraciones con el tiempo y el radio de la nube que aún no se ha diluido, a través de coeficientes de difusión obtenidos experimentalmente.

El tiempo para que la concentración media de la nube se sitúe por debajo del límite inferior de inflamabilidad, calculado mediante este modelo, es igualmente muy pequeño, aunque algo superior al que se obtiene aplicando la metodología de *Hardee y Lee (1975)*; así, para una masa de 1000 kg de propano, los tiempos obtenidos son 2.5 y 1.6 segundos, respectivamente.

En consecuencia, se deduce que para que se produzca una bola de fuego, la fuente de ignición debe encontrarse cerca del punto donde se genera la fuga, lo cual es una justificación más de la asociación entre BLEVE's y bolas de fuego.

2.2.3. Desarrollo de la bola de fuego

Una vez iniciada la combustión de la nube de vapor, la evolución en los primeros momentos y su desarrollo posterior dependen de varios factores, entre los que cabe señalar:

- a) Cantidad de movimiento inicial, función, a su vez, de la velocidad impuesta por el *flash* inicial.
- b) Efectos de la elevación.
- c) Enfriamiento por radiación.

Las etapas implicadas en el desarrollo de la bola de fuego, han sido descritas por *High* (1968) y por *Crawley* (1982). Ambos autores distinguen tres fases principales:

1ª Etapa: Fase de crecimiento. Que, a su vez, se puede subdividir en dos subetapas. En la primera, en la cual se alcanza aproximadamente la mitad del diámetro máximo, la temperatura de la llama llega a 1300 °C y se produce la vaporización y recalentamiento de la nube. El proceso de mezcla aire-combustible durante este periodo es rápido y está potenciado por la turbulencia debida a la alta velocidad del *flash* (*McQuaid*, 1975). En la segunda, se alcanza el diámetro máximo y la temperatura de la llama desciende hasta aproximadamente 1100 °C, debido a efectos provocados por los humos y otros productos parcialmente quemados. Se estima que la duración de esta fase representa el 12% del tiempo total de duración de la bola y coincide aproximadamente con el período en el que la bola permanece sin apenas despegar del suelo.

2ª Etapa: Fase de incendio estable. Es la de mayor duración; en ella se mantiene aproximadamente constantes el diámetro de la bola de fuego y su temperatura.

Se observa una serie de vórtices en la superficie –cuya geometría es aproximadamente esférica– y comienza a elevarse sobre el suelo, adquiriendo forma de hongo. La aireación a través de la superficie es más efectiva que la observada para los incendios en charco, lo cual permite justificar que los valores de la potencia emisiva específica sean mayores que en estos últimos, debido a la mayor rapidez del proceso y la elevada eficacia de la combustión, sin formación de inquemados y hollines. A su vez, según *High* (1968), el proceso de elevación conlleva un aporte suplementario de aire por la parte inferior, que arrastra hacia la bola el combustible que se encuentra a nivel de suelo, lo cual genera un vástago incandescente y la forma típica de hongo –figura 2.2–.

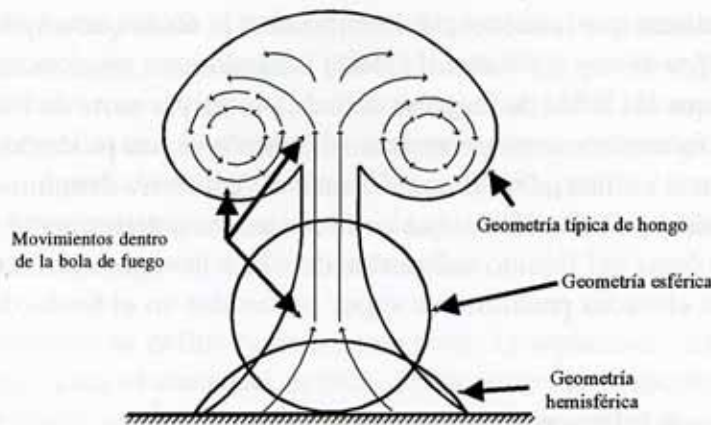


FIGURA 2.2. Evolución de la geometría de la bola de fuego durante su desarrollo (High, 1968).

Así pues, la geometría evoluciona desde una semiesfera a la típica forma de hongo –finalmente un toroide–, pasando por la forma esférica cuando las fuerzas ascensionales comienzan a ser predominantes.

3ª Etapa: Fase de extinción. La llama se hace más tenue observándose pequeños destellos provocados por acumulaciones de combustible que arden sin producir humos.

En el caso particular de las bolas de fuego asociadas a la generación previa de una BLEVE, el desarrollo de este accidente en la mayoría de las situaciones puede describirse a través de las siguientes etapas:

1ª Etapa: Iniciación. Se supone la generación de un incendio exterior. La radiación y convección térmicas o el contacto directo de la llama inciden sobre el depósito o equipo considerado calentando el producto y, por consiguiente, aumentando la presión de vapor de éste. En las paredes se forman burbujas de vapor –nucleación– que se desprenden y se incorporan a la fase gas.

2ª Etapa: Fuga. El aumento de presión y el debilitamiento del material por la elevada temperatura exterior supera la resistencia mecánica del contenedor provocando su rotura brusca. Este efecto es más intenso en la zona del contenedor en contacto con la fase gaseosa, debido al menor coeficiente de transferencia de calor, propiciando un incremento mayor de la temperatura del material.

3ª Etapa: Generación de la bola de fuego. El producto fuga de forma bifásica, produciendo además un intenso *flash* que rompe la masa líquida proyectándola a gran velocidad. El incendio exterior inflama la zona de la nube con concentraciones dentro del intervalo de inflamabilidad, iniciando la formación de la bola de fuego, cuya descripción se ha comentado anteriormente, que depende, según *Chen y cols (1998)*, del volumen de llenado del contenedor, de la naturaleza del producto involucrado y de la temperatura y presión en el interior del recipiente.

Conviene indicar que la secuencia descrita no es la única que origina BLEVE's y bolas de fuego. Así, *Moorhouse y Pritchard (1982)* basándose en observaciones experimentales señalan que aunque las bolas de fuego se deben en la mayor parte de los casos a fugas rápidas de producto en contenedores presurizados, también se han producido en tanques atmosféricos sometidos a un incendio, al manifestarse el fenómeno denominado *boilover* (*Garó, Vantelon y Fernández-Pello, 1996*), que como se indicó anteriormente, provoca la proyección súbita y violenta del líquido inflamable debido a la vaporización repentina de agua u otros líquidos de elevadas presiones de vapor contenidos en el fondo del tanque.

2.2.4. Factores que influyen en la radiación térmica

Los factores que influyen en la magnitud de la radiación térmica generada por las bolas de fuego son los mismos que los descritos para los incendios en charco o depósito, es decir, aquellos relacionados con las propiedades del combustible implicado –entalpía de combustión, temperatura de ebullición, etc.–, las características de la llama –potencia emisiva específica, geometría– y los procesos químicos que tienen lugar en la combustión –sin apenas formación de humos debido a la mejor aireación del sistema–. No hay diferencias con los incendios en charco en relación a los parámetros que condicionan la radiación recibida –dependientes del receptor y de las condiciones atmosféricas–. Así pues, la naturaleza de las sustancias y las características geométricas de la llama juegan un papel esencial en la intensidad de la radiación térmica que llega al objeto expuesto.

Para la estimación de la radiación térmica generada se recurre a distintos modelos, los cuales consideran la bola de fuego bien como un punto donde se concentra la llama, o como una esfera que se mueve desde el suelo y cuyo volumen aumenta durante la elevación, siendo los parámetros más importantes el diámetro máximo, el tiempo de duración y la potencia emisiva específica, que se analizan más adelante.

2.2.5. Propiedades características de las bolas de fuego

Las características primarias de las bolas de fuego son el diámetro, el tiempo de duración y la altura máxima alcanzada. A través de diferentes estudios, ha quedado establecido lo siguiente:

- a) Los valores de las características citadas son cuasi independientes de la naturaleza de la sustancia implicada en el incendio, dependiendo fundamentalmente de la cantidad involucrada.
- b) Se ha encontrado relaciones de tipo potencial entre dichas magnitudes y la masa que participa en la combustión.
- c) El crecimiento del **diámetro** es muy rápido, y, como se ha indicado anteriormente, en los primeros momentos alcanza su valor máximo, produciéndose entonces el despegue del suelo, manteniéndose la bola elevada hasta la finalización del suceso.

- d) El **tiempo de duración** de la bola es pequeño; incluso para grandes cantidades de sustancia, no suele ser superior a un minuto. En la bibliografía se presentan discrepancias en cuanto a su definición. Así, *Hardee y Lee (1977)* lo establecen, aproximadamente, en el doble del tiempo de despegue; *Gayle y Brandsford (1965)* lo estipulan como el período de visibilidad; *Roberts (1982)*, como el período durante el cual la bola se comporta como una fuente de radiación efectiva y *Fay y Lewis (1977 y 1979)* como el tiempo de combustión completa.
- e) La **altura máxima** se define normalmente como la separación máxima alcanzada desde el suelo hasta el centro de la bola. Se ha observado experimentalmente que una bola de fuego se eleva continuamente hasta el momento de su extinción. En general, se admite que la altura oscila entre 0.75 y 1.5 veces el diámetro máximo –*High (1968)*, *Hasegawa y Sato (1978)*, *Center for Chemical Proccess and Safety (1989)*, *Johnson y Pritchard (1990)*–.

2.3. DARDOS DE FUEGO

2.3.1. Definición

Un dardo de fuego se puede definir como: “*La ignición de una fuga continua de gases o vapores inflamables contenido en tuberías o en recipientes sobrepresionados*”. Así pues, el escape no es debido a una rotura catastrófica del contenedor –que daría lugar en la mayoría de los casos a una bola de fuego–, sino que se produce a través de un orificio pequeño respecto al tamaño del contenedor, o por escape de una tubería, generándose una salida turbulenta del combustible en forma de chorro.

En la iniciación de la combustión tiene una gran importancia la velocidad de salida del producto. *Wohl y cols (1949)* tras estudiar el proceso de mezcla después de la fuga y el comportamiento de la combustión, han llegado a la conclusión de la existencia de una velocidad mínima de salida del combustible para la formación del dardo de fuego, denominada *velocidad crítica*.

2.3.2. Formación y desarrollo del dardo de fuego

Se puede suponer las siguientes fases de desarrollo:

- 1ª Etapa: Iniciación:* Fisura o rotura pequeña de un contenedor o tubería de interconexión que almacena o transporta un combustible bajo presión. Las causas de dicha rotura pueden ser variadas –impacto exterior, fallos en soldaduras, bridas o válvulas, fatiga del material, etc.–.
- 2ª Etapa: Fuga:* En general, al tratarse en la mayor parte de los casos de gases licuados, almacenados bajo presión, se supone que la fuga se produce inicialmente en fase

líquida produciéndose un *flash* que depende de las condiciones termodinámicas del fluido. Más tarde, dependiendo de la posición del orificio y de las características del fluido, la fuga puede producirse en estado vapor. El régimen de la fuga suele ser muy turbulento, lo que facilita la incorporación de aire y el proceso de mezcla con éste.

3ª Etapa: Ignición: Según sea el escenario accidental, la evolución del proceso difiere: Si inmediatamente a la fuga se encuentra un punto de ignición se produce el dardo de fuego; por el contrario, si no hay un foco de ignición próximo, se origina una nube constituida por el *flash* inicial y, en su caso, por la evaporación desde el charco, que evoluciona en función de las características orográficas y meteorológicas. Si en su recorrido, la nube encuentra un foco de ignición y deflagra (incendio flash), el frente de llama retrocede hacia el origen del chorro y si éste persiste se genera el dardo de fuego.

2.3.3. Factores que influyen en la radiación térmica

Al igual que ocurre con los dos incendios anteriores, la radiación térmica generada por un dardo de fuego depende de numerosos factores, relacionados fundamentalmente con las propiedades del combustible fugado –entalpía de combustión, temperatura de ebullición...–, las características de la llama –potencia emisiva y geometría–, los procesos químicos implicados en la combustión –formación de humos, entre otros–, así como las características de la fuga –velocidad de salida del gas– y las condiciones ambientales –presencia de viento–.

En el caso de incidencia directa del dardo sobre los elementos próximos, los efectos son considerablemente superiores a los debidos a la radiación.

En cuanto a la **geometría de la llama**, la figura 2.3 representa esquemáticamente un dardo de fuego.



FIGURA 2.3. Representación esquemática de un dardo de fuego.

Los dardos son modelizados de diferentes formas según la metodología de cálculo para la estimación de la intensidad de radiación térmica. Así, para las más sencillas, se considera la llama concentrada en un punto, mientras que aquellas que requieren una descripción más ajustada a la realidad lo configuran como un tronco de cono o un cilindro. De éstas, la geometría cónica –truncada– es la más utilizada, siendo las magnitudes más importantes para establecer la radiación térmica, la longitud, las anchuras de las bases y el ángulo de orientación del dardo con respecto al suelo –o a la vertical–.

Con relación a las **condiciones de la fuga**, interesa tener en cuenta la *distancia de despegue –lift off–* y la velocidad de salida del chorro. La primera se define como la longitud medida desde el orificio de salida hasta donde se inicia la llama –figura 2.3–. Esta separación es debida a que la turbulencia de salida del gas impide la combustión estable. En este sentido, *Kent (1968)* ha evaluado dicho aspecto, llegando a la conclusión que cuando la descarga es inferior a 0.2 Mach, la distancia de despegue es prácticamente nula, iniciándose el dardo en el mismo orificio. En cuanto a la velocidad de salida, se ha constatado que el incremento de su valor provoca un descenso en la fracción de energía radiante y, por consiguiente, en los niveles de radiación recibida (*TNO, 1997*).

Otro aspecto fundamental en la evaluación de la radiación térmica es la **presencia de viento**, ya que su influencia en la geometría del dardo es mucho mayor que en los incendios en charco y en las bolas de fuego.

2.4. INCENDIOS FLASH

Este accidente hace referencia a la combustión de nubes de vapor no confinadas que está caracterizada por la gran rapidez del frente de llama. La secuencia típica de este evento puede describirse de la forma siguiente:

1ª Etapa: Fuga: El producto fugado debe ser un gas combustible –licuado o no– que irrumpe como tal o se genera como consecuencia de la rápida vaporización desde un charco.

2ª Etapa: Dispersión: El gas es arrastrado y dispersado por el aire. Generalmente, el producto tiene una temperatura inicial inferior a la ambiental –como consecuencia de la expansión cuasi adiabática de la fuga– y en la mayoría de los casos su masa molecular es superior a la del aire. Ambas características originan una nube densa que avanza reptando por las zonas más bajas del terreno, condicionando la dispersión, que se produce de forma más lenta que la de los gases ligeros o neutros.

3ª Etapa: Ignición: Si la nube encuentra un punto de ignición se produce la combustión de la región de la nube donde la concentración está comprendida entre los límites de inflamabilidad. Si la ignición se produce cerca de la fuga y el volumen fugado es

importante puede producirse una bola de fuego, en la que interviene toda la masa fugada que se halla por encima del límite inferior de inflamabilidad.

Debido a la elevada velocidad del frente de llama se originan ondas de presión cuyos efectos se hacen sentir a mayores distancias que la radiación térmica, denominándose como "explosión de nube de vapor no confinada" –EVNC–. La transición entre el incendio y la explosión –que depende en gran medida de la masa de vapor de la sustancia inflamable implicada– es difícil de precisar. En cualquier caso, sólo se suelen considerar los efectos de la radiación térmica dentro de la nube, ya que el tiempo de duración de la combustión es muy pequeño aunque la intensidad es elevada.

Finalmente, cabe indicar que si el incendio *flash* tiene lugar en el interior de un depósito o recinto confinado se puede producir una explosión, que puede ser detonante, por lo que los fenómenos peligrosos de mayor significación son mecánicos –ondas de presión e impulso mecánico así como la formación de proyectiles–, denominándose a este evento explosión confinada o, en su caso, de depósito o contenedor.

2.5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Center for Chemical Process and Safety (AIChE) and Technology, Inc.; (1989). *Guidelines for chemical process quantitative risk analysis*, pp 126, 142, 159, 161, 169. (Citado por Prugh, 1994).
- Chen, H.; Lin, M.; Chao, F.; (1998). *Thermal response model and thermal risk analysis for LPG Storage*. J. Chin. Inst. Chem. Engrs., **29**(1), 45-52.
- Crawley, F.K.; (1982). *The effects of the ignition of a major fuel spillage*. I. Chem. E. Symposium Series, **71**, The Assessment of Major Hazards Symposium, 125-145.
- Fay, J.A.; Lewis, D.H.; (1977). *Unsteady burning of unconfined fuel vapour clouds*. 16th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 1397-1405.
- Fay, J.A.; Desgroseilliers, G.J.; Lewis, D.H.; (1979). *Radiation from burning hydrocarbon clouds*. Combust. Sci. Technol., **20**, 141-151.
- Fernandez-Pello, A.C. (1991). *Proceedings of The ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference*. J.R. Lloyd and Y. Kurosaki, eds., ASME Book 10309E; 261.
- Garo, J.P., Vantelon, J.P.; Fernández-Pello, A.C.; (1996). *Effects of the fuel boiling point on the boilover burning of liquid fuels spilled on water*. 26th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 1461-1467.
- Gayle, J.B.; Brandsford, J.W.; (1965). *Size and duration of fireball from propellant explosions*. NASA Report TMX-53314. (Citado por Lihou y Maund, 1982).
- Hardee, H.C.; Lee, D.O.; (1975). *The expansion of clouds from pressurised liquids*. Accident analysis and prevention, **7**, 91-102.
- Hardee, H.C.; Lee, D.O. (1977). *A simple conduction model for skin burns resulting from exposure to chemical fireballs*. Fire Research, **1**, 199-205.
- Hasegawa, K.; Sato, K.; (1977). *Study on the fireball following steam explosion of n-pentane*. Proceedings of the Second International Symposium on Loss Prevention and Safety

- Promotion in the Process Industry, Heidelberg, 297-304. (Citado por *Lihou y Maund, 1982*).
- Hasegawa, K; Sato, K.; (1978). Tech. Mem. Fire Res. Inst., **12**, Tokio. (Citado por *Lihou y Maund, 1982*).
- High, R.W.; (1968), *The saturn fireball*. Annals of New York Academy of Science, **152**, 441-451.
- Johnson, D.M.; Pritchard, M.J.; (1990). *Large escale experimental study of boiling liquid expanding vapour explosions (BLEVES)*, Gastech LNG/LPG Conference and Exhibition, Gastech.
- Joulain, P.; (1996). *Convective an Radiative Transport in pool and wall fires: 20 years of research in Poitiers*. Fire Safety Journal, **26**, 99-149.
- Kent, G.R.; (1968). *Practical Design of Flare Stacks*. Hydrocarbon Processing, **43**(8), 122.
- Kletz, T.A.; (1977). *Unconfined vapor cloud explosions*. AIChE Loss prevention, **11**, 50, Appendix 1.
- Lees, F.P.; (1980). *Loss prevention in the process industries*. Butterworth. (Citado por *Crocker y Napier, 1988*).
- Lihou, D.A.; Maud, J.K.; (1982). *Thermal radiation hazard from fireball*. I. Chem. E. Symposium Series, **71**, The Assessment of major Hazards Symposium, 131-224.
- Maurer, B.; Hess, K.; Giesbrecht, H.; Leuckel, W.; (1977). *Modelling of vapour cloud dispersion and deflagration after bursting of tanks filled with liquefied gas*. Proceeding of 2nd International Loss Prevention Symposium, Frankfurt, European Federation of Chemical Engineers, 305-321.
- McDevitt, C.A.; (1992). *Initiation of a boiling liquid expanding vapour explosion*. Diss. Abstr. Int. B, **53**(1), 432-433.
- McQuaid, J., (1975). *Air entrainment into blended axisymmetric sprays*. I. Mech. E. Proceedings, **189**.
- Melhem, G.A., Croce, P.A.; (1993). *Data summary of the National Fire Protection Association's BLEVE test*. Process Safety Progress, **12**(2), 76-82.
- Moorhouse, J.; Pritchard, M.J.; (1982). *Thermal radiation hazards from large pool fires and fireballs - A literature review*. I. Chem. E. Symposium Series, **71**, The Assessment of Major Hazards Symposium, 397-428.
- Mudan, K.S.; (1984). *Thermal radiation hazards from hydrocarbon pool fires*. Prog. Energy Combust. Sci., **10**, 59-80.
- National Fire Protection Association, (1986). *Fire protection handbook*, 16 th. (National Fire Protection Association, (1987), *Manual de Protección contra incendios*. Editorial MAPFRE S.A., Madrid.)
- Prugh, W.; (1991a). *Quantify BLEVE hazards*. Chemical Engineering Progress, **1**, 66-72.
- Prugh, W.; (1991b). *Quantitative evaluation of BLEVE hazards*. J. of Fire Prot. Engr., **3**(1), 9-24.
- Roberts, A.F.; (1982). *Thermal radiation hazards from release of LPG from pressurized storage*. J. Fire Safety Studies, **4**, 197-212.
- TNO; (1997). *Methods for the calculation of physical effects (The yellow book), Chapter 6 Heat flux from fires*. C.J.H. van den Bosch y R.A.P.M. Weterings, eds. The Hague (Holland).

Wall, M.L.; (1978). *Just What is a BLEVE*. Fire Journal, NFPA, Mass, 46.

Winder, C.; Tottszer, A.; Navratil, J.; Tandon, R.; (1992). *Hazardous materials incidents reporting: Results of a nationwide trial*. Journal of Hazardous Materials, **31**, 119-134.

Wohl, K.; Gazley, C.; Kapp, N.; (1949). 3rd Symposium (International) on combustion, The Combustion Institute, 288. (Citado por Crocker y Napier, 1988).

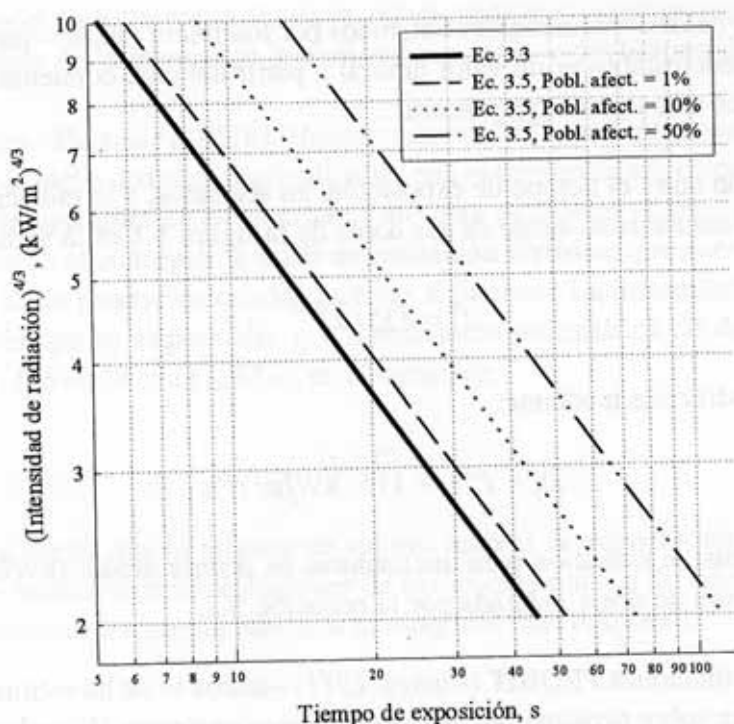


FIGURA 3.2. Representación de las ecuaciones 3.3 –datos de Buettner– y 3.5 –TNO (1989)– para quemaduras de primer grado.

estas quemaduras para dosis de $118 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3} \text{ s} = 4.7 \text{ kW/m}^2$ durante 15 s-. El mismo valor de intensidad fue anteriormente propuesto por Robertson (1976) como límite para causar dolor sin aparición de ampollas –quemaduras de primer grado–, si bien no establece el tiempo de exposición.

Por otra parte, Mudan (1984) indica que la exposición prolongada a una radiación de 1.7 kW/m^2 no produce sensación de dolor, casi coincidente con lo publicado por Bagster y Pitblado (1989) y el Center for Chemical Process Safety (1989) que la sitúan en 1.6 kW/m^2 . Esto es, dicho valor puede considerarse como el límite inferior de aplicabilidad de la ecuación 3.3, de manera que para valores inferiores a 1.7 kW/m^2 el tiempo de exposición no tiene influencia en el nivel de daño.

Si se tiene en cuenta que la radiación máxima que recibe una persona en un día de verano soleado alcanza el valor de 1 kW/m^2 , la propuesta de Mudan (1984) puede parecer excesiva, dado que, como es sabido, una exposición prolongada bajo dichas condiciones puede producir daños considerables. Sin embargo, a efectos de planificación ante incendios, el valor aportado por Mudan puede considerarse adecuado, dado que, en general, la población está protegida por la ropa y, además, alcanzará algún enclave protegido en un tiempo no muy alto (segundos o minutos).

3.1.2. Quemaduras de segundo grado: tipología y valores umbral

Las quemaduras de segundo grado afectan considerablemente a la epidermis –capa externa de 0.05 a 0.1 mm de espesor–, provocando la aparición de ampollas, presentando el resto un aspecto húmedo y enrojecido, siendo necesario el tratamiento médico para recuperar la zona dañada.

Se puede encontrar un valor de la dosis umbral que provoca la formación de ampollas en seres humanos a partir de los datos experimentales obtenidos por *Stoll y Green (1952)* y *Metha y cols (1973)*, recogidos en la figura 3.3.

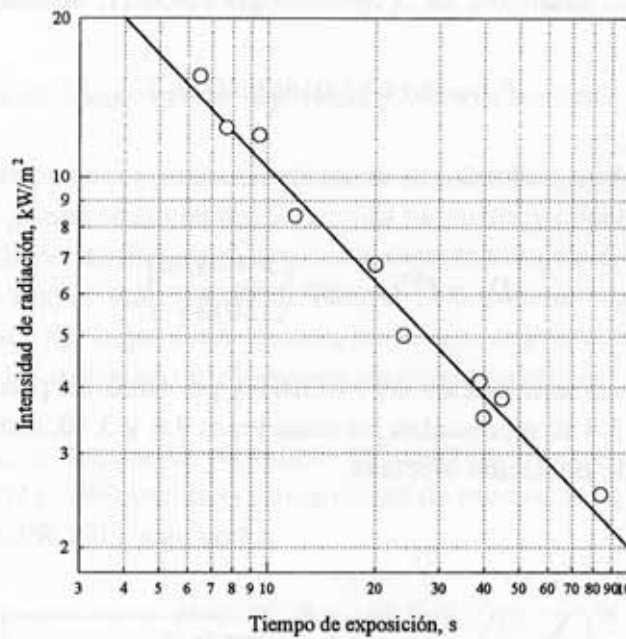


FIGURA 3.3. Datos experimentales obtenidos por *Stoll y Green (1952)* y *Metha y cols (1973)* y recta de ajuste para quemaduras de segundo grado.

La ecuación analítica ajustada es la siguiente:

$$D_{II} = I^{4/3} t_e \approx 250 \left(\text{kW/m}^2 \right)^{4/3} \text{s} \tag{3.6}$$

siendo D_{II} la dosis de radiación para quemaduras de segundo grado, $(\text{kW/m}^2)^{4/3}\text{s}$, donde puede observarse que esta ecuación adopta la misma forma que la 3.1.

Bagster y Pitblado (1989) proponen como dosis umbral la equivalente a recibir una intensidad de radiación de 4.7 kW/m^2 durante 30 s. El valor resultante, $236 (\text{kW/m}^2)^{4/3}\text{s}$, se aproxima al anterior. *Lihou y Maund (1982)*, ajustan los datos publicados por *Stoll y Chianta (1971)*, experimentando con piel de cerdo, obteniendo la siguiente relación:

$$I = \left(\frac{50}{t_e^{0.71}} \right) \quad (3.7)$$

que puede transformarse en una ecuación análoga a la 3.6, esto es:

$$D_{II} = I^{1.4} t_e = 239 \text{ (kW / m}^2\text{)}^{1.4} \text{s} \quad (3.8)$$

proporcionado también un valor numérico próximo a los anteriores, si bien se observa una ligera variación del exponente de la intensidad de radiación térmica.

TNO (1989) propone igualmente una ecuación para el cálculo de la dosis para quemaduras de segundo grado basándose en la metodología PROBIT, obteniendo:

$$P = -43.14 + 3.0186 \ln(I^{4/3} t_e) \quad (3.9)$$

a partir de la cual se obtiene el valor de dosis siguiente:

$$D_{II} = I^{4/3} t_e = \exp \left(\frac{P + 43.14}{3.0186} \right) \quad (3.10)$$

donde, de nuevo, la dosis será función del PROBIT y por tanto del porcentaje de población afectada. En la figura 3.4 se representan las ecuaciones 3.6 y 3.10, estimando para esta última el 1, 10 y 50 % de población afectada.

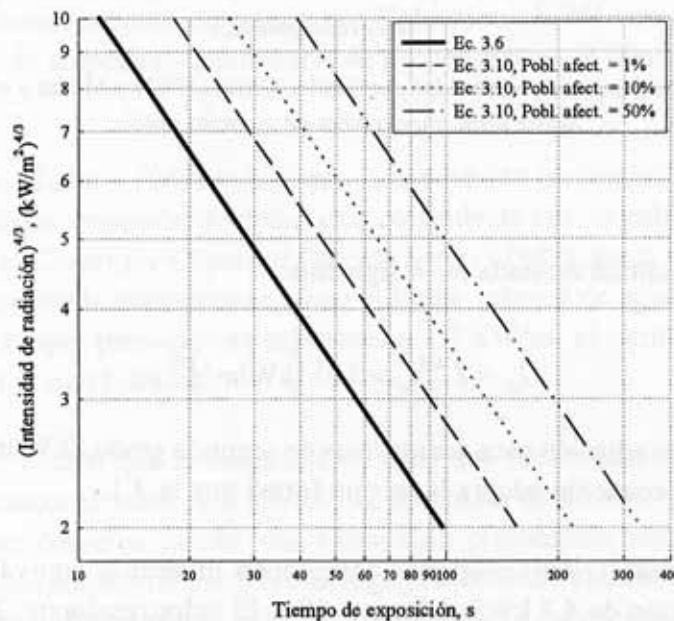


FIGURA 3.4. Representación de las ecuaciones 3.6 y 3.10, para valores umbral de quemaduras de segundo grado.

En este caso se observa una menor concordancia de las ecuaciones 3.6 y 3.10 (1% de población afectada), con relación a la obtenida para quemaduras de primer grado –ecuaciones 3.3 y 3.5 (1% de población afectada)–. Una posible razón de esta desviación puede deberse al método utilizado por *TNO* para obtener la ecuación 3.10, consistente en la interpolación teórica entre las funciones PROBIT correspondientes a quemaduras de primer grado y el umbral inferior de letalidad.

En definitiva, la ecuación 3.6 se estima más adecuada para la determinación del valor del umbral de quemaduras de segundo grado, dado que se ha obtenido a partir de datos experimentales con humanos, y resulta concordante con los encontrados por diversos autores, antes citados.

3.1.3. Quemaduras de tercer grado: tipología y valores umbral

Las quemaduras de tercer grado se extienden a la dermis –capa interna de la piel de 1 a 2 mm de espesor– donde se alojan terminaciones nerviosas y raíces capilares, provocando la insensibilidad de la parte afectada que presenta aspecto seco, de diversa coloración –tanto más oscura cuanto mayor sea el nivel de daño–. Esta zona es vulnerable a los agentes patógenos que pueden dar lugar a infecciones, por lo que requiere atención médica urgente y en muchos casos los daños son irreversibles, pudiendo provocar la muerte.

En este caso no se dispone de relaciones suficientemente contrastadas para establecer la dosis umbral. *TNO (1989)* evalúa la probabilidad de muerte por quemaduras de este tipo mediante la función PROBIT siguiente:

$$P = -36.38 + 2.56 \ln(I^{4/3} t_e) \quad (3.11)$$

a partir de la cual puede obtenerse la dosis umbral para este nivel de daño:

$$D_{III} = I^{4/3} t_e = \exp\left(\frac{P + 36.38}{2.56}\right) \quad (3.12)$$

donde D_{III} es la dosis de radiación térmica para quemaduras de tercer grado, $(\text{kW/m}^2)^{4/3}\text{s}$.

Hardee y Lee (1973), partiendo del modelo de *Bader (1971)* para el cálculo de la intensidad de radiación térmica generada por una bola de fuego, indican que valores de radiación de aproximadamente 114 kJ/m^2 puede provocar quemaduras de tercer grado en pocos segundos.

3.1.4. Factores que condicionan la mortalidad por quemaduras de segundo y tercer grado

Cuando se producen quemaduras de segundo y tercer grado existe una cierta probabilidad de mortalidad que depende de la superficie cutánea dañada y de la edad. La tabla 3.1 pone de manifiesto esta relación para una población desprovista de ropa.

TABLA 3.1. Relación de mortalidad en función de la edad y del porcentaje de área quemada (*Bull, 1971*)

% área quemada	Edad (años)							
	0-4	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34	35-39	40-44
≥ 93	1	1	1	1	1	1	1	1
88-92	0.9	0.9	0.9	1	1	1	1	1
83-87	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1	1	1
78-82	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	1
73-77	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9
68-72	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9
63-67	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8
58-62	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7
53-57	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7
48-52	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.5	0.6
43-47	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4
38-42	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3
33-37	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3
28-32	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
23-27	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1
18-22	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1
13-17	0	0	0	0	0	0	0	0
8-12	0	0	0	0	0	0	0	0
3-7	0	0	0	0	0	0	0	0
0-2	0	0	0	0	0	0	0	0
	45-49	50-54	55-59	60-64	65-69	70-74	75-79	80-
≥ 93	1	1	1	1	1	1	1	1
88-92	1	1	1	1	1	1	1	1
83-87	1	1	1	1	1	1	1	1
78-82	1	1	1	1	1	1	1	1
73-77	1	1	1	1	1	1	1	1
68-72	0.9	0.9	1	1	1	1	1	1
63-67	0.9	0.9	1	1	1	1	1	1
58-62	0.8	0.9	0.9	1	1	1	1	1
53-57	0.7	0.8	0.9	0.9	1	1	1	1
48-52	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1	1	1
43-47	0.5	0.6	0.7	0.8	1	1	1	1
38-42	0.4	0.5	0.6	0.8	0.9	1	1	1
33-37	0.3	0.4	0.5	0.7	0.8	0.9	1	1
28-32	0.2	0.3	0.4	0.6	0.7	0.9	1	1
23-27	0.2	0.2	0.3	0.4	0.6	0.7	0.9	1
18-22	0.1	0.1	0.2	0.30	0.4	0.6	0.8	0.9
13-17	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7
8-12	0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.5
3-7	0	0	0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4
0-2	0	0	0	0	0.1	0.1	0.2	0.2

La situación habitual, sobre todo en ámbitos industriales, es que la población al ir vestida encuentre una importante protección frente a la radiación térmica, siempre que la ropa no alcance los límites de ignición. La tabla 3.2 recoge la distribución, en porcentaje, de la piel según las distintas partes del cuerpo.

TABLA 3.2. Distribución en porcentaje de la piel por zonas para personas con edad superior a 15 años (*Brandwonden, 1979*)

Parte del cuerpo	Porcentaje de piel sobre la totalidad
Cabeza	7
Cuello	2
Tronco (torso)	13
Tronco (espalda)	13
Glúteos	5
Genitales	1
Brazos	8
Antebrazos	6
Manos	5
Muslos	19
Pantorrillas	14
Pies	7
Zona desnuda	20

Las partes sombreadas de la tabla 3.2 suelen encontrarse desnudas. En la tabla 3.1 puede obtenerse la probabilidad de mortalidad para la población afectada por este porcentaje de piel quemada –ver tramo correspondiente a 18-22% de área quemada–, observándose una reducción significativa de la mortalidad respecto a poblaciones desprovistas de ropa.

Si se produce la ignición de la ropa, se considera que la mortalidad es prácticamente segura. Según *TNO (1989)* la dosis de radiación límite –definida como $D=I^2t$ – para que se produzca la ignición está comprendida entre $2.5 \cdot 10^4$ y $4.5 \cdot 10^4$ (kW/m²)²s. Este intervalo depende de las características y espesor de los tejidos utilizados.

Si no se produce la ignición de la vestimenta *TNO* estima –para una distribución de población similar a la holandesa– que sólo el 14% de los individuos afectados sufrirán quemaduras de segundo y tercer grado con resultado de muerte. Por ello, para cuantificar el número de fallecimientos en poblaciones vestidas, *TNO* propone el siguiente procedimiento:

1. Conocida la dosis, calcular la función PROBIT para mortalidad mediante la ecuación 3.11 –válida para poblaciones desnudas–.
2. Con el valor de PROBIT así calculado, determinar el porcentaje de mortalidad –tabla I.1, anexo I–.

Partiendo de datos experimentales obtenidos por *Buettner (1951b)* –representados en la figura 3.1– se puede establecer un valor umbral a partir del cual comienza la sensación de dolor y se produce este tipo de quemaduras.

La correlación entre el tiempo de exposición, en segundos, y la radiación incidente, en kW/m², obtenida mediante el ajuste de los datos de la figura 3.1 es la siguiente:

$$t_e = (35/I)^{1.33} \quad (3.2)$$

que puede ser modificada mediante:

$$D_1 = I^{4/3} t_e \approx 115 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3}\text{s} \quad (3.3)$$

donde D_1 es la dosis de radiación para quemaduras de primer grado, (kW/m²)^{4/3}s, que responde a la definición de dosis indicada por la ecuación 3.1.

Mediante las funciones PROBIT (*Finney, 1971*) –anexo I– se ha estimado el efecto de la radiación térmica sobre personas debido a explosiones nucleares (*Eisenberg, 1975*). En el caso de incendios de hidrocarburos, la radiación térmica tiene una longitud de onda mayor que la generada en las explosiones nucleares, de manera que la energía térmica que se transmite es mayor que la puesta en juego en las radiaciones nucleares. En este sentido, *TNO (1989)* modifica las expresiones iniciales de *Eisenberg (1975)*, para tener en cuenta lo anterior, utilizando datos experimentales de *Stoll y Chianta (1969)*, proponiendo la ecuación siguiente:

$$P = -39.83 + 3.0186 \ln(I^{4/3} t_e) \quad (3.4)$$

donde P es la función PROBIT.

A partir de la ecuación 3.4 puede obtenerse la expresión de la dosis:

$$D_1 = I^{4/3} t_e = \exp\left(\frac{P + 39.83}{3.0186}\right) \quad (3.5)$$

La figura 3.2 compara las ecuaciones 3.3, obtenida a partir de los datos de *Buettner*, y la 3.5, propuesta por *TNO (1989)* para el 1, 10 y 50% de población afectada (la relación entre el PROBIT y el porcentaje de población afectada se indica en el anexo I).

La proximidad de las líneas correspondientes a las ecuaciones 3.3 y 3.5 (para el 1% de afectados) puede considerarse aceptable, de manera que la primera puede representar un valor umbral conservador –mínimo– para la génesis de quemaduras de primer grado en personas expuestas a incendios de hidrocarburos.

Este límite es corroborado por *Bagster y Pitblado (1989)* que constatan la aparición de

3. Multiplicar el valor del porcentaje de mortalidad por 0.14 para determinar el porcentaje real de fallecimientos, como consecuencia de la protección proporcionada por la ropa.

Obsérvese que el 14 % corresponde, según la tabla 3.2, al área de la piel que generalmente estará expuesta –cabeza, cuello y manos–.

3.2. EFECTOS SOBRE LOS MATERIALES

La radiación térmica puede afectar a edificaciones y equipos de proceso cercanos al origen del accidente. El estudio de estos efectos debe concentrarse sobre aquellos componentes esenciales de estas construcciones; en este sentido *TNO (1989)* considera los siguientes materiales críticos:

- a) Madera.
- b) Materiales sintéticos.
- c) Vidrio.
- d) Acero.

considerando dos niveles de daño:

Nivel 1, que supone la ignición de los mismos, así como la rotura de vidrios o fallos de elementos estructurales de edificios.

Nivel 2, de menor importancia, en los cuales se produce decoloraciones serias en la superficie del material, desprendimiento de pinturas y deformaciones apreciables de elementos estructurales de edificios, sin que se produzca el colapso.

3.2.1. El concepto de dosis de radiación térmica aplicado a los materiales

La estimación de valores umbral a partir de los cuales se producen daños en materiales presenta una gran complejidad, dada la diversidad de parámetros y circunstancias que afectan al fenómeno –tales como el tipo de material constructivo del contenedor, espesor, geometría, contacto o no con la llama, contenido del recipiente, revestimientos, aislamiento, condiciones de almacenamiento, etc.–, lo que justifica la escasa bibliografía publicada sobre este tema. Por otra parte, estos aspectos están directamente relacionados con la manifestación del denominado “efecto dominó” que tiene lugar cuando un accidente “primario” provoca otro “secundario”, cuyas consecuencias pueden ser más importantes que las ocasionadas por el precursor.

Según *Robertson (1976)* pueden producirse incendios secundarios en edificaciones cuando éstas se hallen sometidas a flujos de radiación superiores a 12.6 kW/m^2 y en plantas

de proceso y tanques de almacenamiento de productos inflamables cuando la radiación sea superior a 37.8 kW/m^2 . El valor límite para edificaciones es inferior al de plantas de proceso debido a la generación de mayores emisiones de vapores inflamables en los elementos estructurales de madera, papel, plásticos, recubrimientos, etc. El segundo límite se fundamenta en estudios sobre distribución de tanques de almacenamiento de productos inflamables, donde se establece que, por razones de seguridad ante el incendio de un tanque, cualquier otro contiguo no debe recibir una radiación superior al valor indicado. El citado autor establece un límite de tiempo en torno a 20 minutos para que se produzca la ignición del elemento vulnerable, próximo al considerado por *Lihou y Maund (1982)* -17 minutos-, quienes proponen la utilización de la siguiente ecuación para la génesis de incendios secundarios en edificaciones:

$$\int_0^{t'} I dt = 12.6 \cdot 10^3 \text{ (kW/m}^2\text{)s} \quad (3.13)$$

y para equipos de proceso y tanques de almacenamiento:

$$\int_0^{t'} I dt = 37.8 \cdot 10^3 \text{ (kW/m}^2\text{)s} \quad (3.14)$$

Sin embargo, ante la variedad de circunstancias que pueden tomar parte en estos fenómenos, la utilización de las ecuaciones 3.13 y 3.14 debe tomarse con muchas reservas.

3.2.2. Intensidad crítica de radiación

Dada la dificultad para establecer y utilizar valores umbral de dosis de radiación, *TNO (1989)* propone el concepto de **intensidad crítica de radiación** para estimar el nivel de daño sobre materiales. Partiendo del concepto de dosis es evidente que cuanto mayor sea la intensidad de radiación térmica recibida, menor debe ser el tiempo de exposición necesario para producir la ignición del material. Sin embargo, en el extremo opuesto, por debajo de un determinado valor de intensidad, se puede observar que no se produce la ignición aunque el tiempo de exposición sea muy elevado. Este valor define la intensidad crítica de radiación para materiales, concepto que supone el umbral inferior a partir del cual se aplica el concepto de dosis.

Como se puede apreciar en la representación genérica de la figura 3.5, la intensidad crítica de radiación necesaria para producir la ignición presenta un valor cuasi asintótico a medida que aumenta el tiempo de exposición.

TNO (1989) propone valores de intensidad crítica de radiación térmica orientativos para estimar daños de nivel 1 y 2 para materiales comunes de construcción -tabla 3.3-.

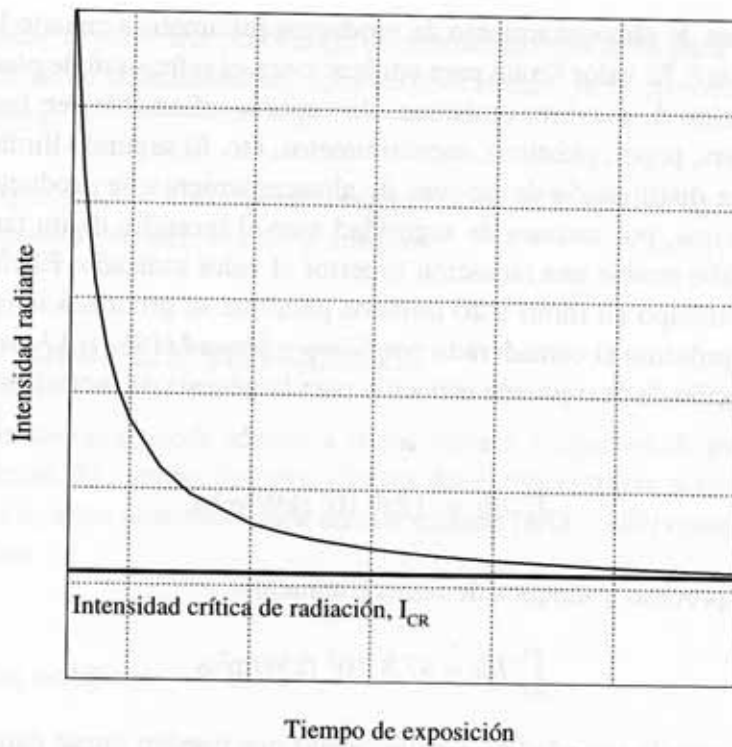


Figura 3.5. Representación genérica de la intensidad crítica de radiación para materiales.

TABLA 3.3. Intensidades críticas de radiación y temperaturas de ignición para diferentes materiales (TNO, 1989)

Material	Daños de nivel 1		Daños de nivel 2	
	I_{CR} , kW/m ²	T, K	I_{CR} , kW/m ²	T, K
Madera	15	683	2	373
Sintético	15		2	373
Vidrio	4	393	-	-
Acero	100	773	25	473

Otros autores –Romano y cols (1885)– recogen diferentes valores de intensidad crítica o máxima tolerables para varios materiales, indicados en la tabla 3.4.

TABLA 3.4. Intensidades de radiación máxima tolerable para diferentes materiales
(Romano y cols, 1985)

Material	Máxima radiación tolerable, kW/m ²
Cemento	60
Cemento precomprimido	40
Hormigón	200
Acero	40
Madera	10
Vidrio	30-300
Pared de ladrillos	400

Puede observarse las discrepancias con los valores de *TNO*, si bien los autores antes citados no indican el nivel de daño considerado.

3.3. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bader, D.E.; Donaldson, A.B.; Hardee, H.C.; (1971). *Liquid-propellant rocket abort fire model*. Journal of Spacecraft and Rockets, **8**(12), 1216-1219.
- Bagster, D.F; Pitblado, R.M.; (1989). *Thermal hazards in the process industry*. Chemical Engineering Progress, **7**, 69-75.
- Brandwonden; (1979). Philips-Duphar Nederland B.V., Amsterdam. (Citado por *TNO*, 1989).
- Buettner, K.; (1951a). *Effects of extreme heat and cold on human skin. I. Analysis of temperature changes caused by different kinds of heat application*. J. Appl. Physiol., **3**, 691-702.
- Buettner, K.; (1951b). *Effects of extreme heat and cold on human skin. II. Surface temperature, pain and heat conductivity in experiments with radiation heat*. J. Appl. Physiol., **3**, 703-713.
- Bull, J.P.; (1971). *Revised analysis of mortality due to burns*. Medical Research Council Industrial Injuries and Burns Unit, Birmingham Accident Hospital, Birmingham, The Lancet, 1133-1134. (Citado por *TNO*, 1989).
- Center for Chemical Process and Safety (AICHe) and Technology, Inc.; (1989). *Guidelines for chemical process quantitative risk analysis*. pp 126, 142, 159, 161, 169. (Citado por Prugh, 1994).
- Eisenberg, N.A.; Lynch, C.J.; Breeding, R.J.; (1975). *Vulnerability Model: A simulation system for assessing damage resulting from marine spills (VMI)*. US Coast Guard, Office of Research and Development, Report n°. CGD-137-75, NTISAD-015-245. (Citado por *TNO*, 1989)
- Finney, D.L.; (1971). *Probit analysis*. Cambridge University Press, London. (Citado por *TNO*, 1989).
- Hardee, H.C.; Lee, D.O.; (1973). *Thermal hazard from propane Fireballs*. Transportation planning and technology, **2**, 121-128.
- Hardee, H.C.; Lee, D.O. (1977). *A simple conduction model for skin burns resulting from exposure to chemical fireballs*. Fire Research, **1**, 199-205.

Capítulo

4

Modelos de cálculo de la intensidad y de la dosis de radiación térmica

La estimación de la intensidad de la radiación térmica recibida por elementos vulnerables situados en los alrededores de los incendios requiere el conocimiento de numerosas variables, tales como la geometría del incendio, el calor generado por la combustión, la fracción que es emitida en forma de radiación, la posible formación de humos, la radiación absorbida por la atmósfera, la posición del objeto, etc. Para los distintos tipos de incendios, se han desarrollado varios modelos de cálculo siendo los más citados los que se indican en la tabla 4.1.

TABLA 4.1. Modelos semiempíricos para estimar la radiación térmica generada en incendios de productos inflamables

Modelos puntuales	Fuente Puntual (MFP) Fuente Múltiple (MFPM)
Modelos de superficie emisora	Llama sólida (MLIS) Radiador Equivalente (MRE) Radiador Equivalente Aproximado (MREA)

De todos ellos, los más utilizados son el de fuente puntual (MFP), que es el de mayor sencillez, y el de llama sólida (MLIS), más riguroso al adaptarse mejor a la realidad del fenómeno. Ambos modelos se describen a continuación.

Una vez determinada la intensidad térmica sobre cualquier receptor, se puede abordar el cálculo de la dosis de radiación, cuyas relaciones causa-efecto se han tratado en el capítulo anterior. Al final de este capítulo se procede al desarrollo de las expresiones generales de la dosis de radiación sobre los seres humanos, teniendo en cuenta los distintos tiempos de duración de los incendios, lo que obliga a considerar hipótesis diferentes en cuanto al establecimiento de los tiempos de exposición.

4.1. EL MODELO DE FUENTE PUNTUAL (MFP)

Los supuestos en que se basa la aplicación de este modelo son los siguientes:

- Lihou, D.A.; Maund, J.K.; (1982). *Thermal radiation hazard from fireball*. I. Chem. E. Symposium Series, **71**, The Assessment of Major Hazards Symposium, 191-224.
- Metha, A.K.; Wong, F.; Williams, G.C.; (1973). *Measurement of flammability and burn potential of fabrics*. Summary Report to NSF-Grant #GI-31881, Fuels Research Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts. (Citado por Mudan, 1984).
- Mudan, K.S.; (1984). *Thermal radiation hazards from hydrocarbon pool fires*. Prog. Energy Combust. Sci., **10**, 59-80.
- Robertson, R.B.; (1976). *Spacing in chemical plant design against loss by fire*. I. Chem. E. Symposium Series, **47**, Accidental release, assessment containment and control, 157.
- Romano, A.; Piccinini, N.; Bello, G.C.; (1985). *Evaluación de las consecuencias de incendios, explosiones y escapes de sustancias tóxicas en plantas industriales*. Ingeniería Química, **noviembre**, 271.
- Shield, S.R.; (1995). *The modelling of BLEVE fireball transients*. I. Chem. E. Symposium Series, **139**, 227-236.
- Stoll, A.M.; Chianta, M.A.; (1969). *Method and rating system for evaluation of thermal radiation*. J. Appl. Physiol., **14**, 373-382.
- Stoll, A.M.; Chianta, M.A.; (1971). Trans. N.Y. Acad. Sci., 649-670. (Citado por TNO, 1989).
- Stoll, A.M.; Greene, L.C.; (1952). *Relationship between pain and tissue damage due to thermal radiation*. J. Appl. Physiol., **14**, 373-382.
- TNO; (1989). *Methods for the determination of possible damage*. -"The green book"- CPR 16E. CIP-data of the Royal Library. The Hague, The Netherlands.

1. El proceso de combustión se concentra en un punto, desde donde se emite toda la energía radiante.
2. Para cada sustancia la energía radiada es una fracción de la energía total producida en el proceso de combustión.
3. La propagación de la radiación sigue una geometría esférica, teniendo como origen el punto donde se supone concentrado el incendio.

Según esto, la intensidad de radiación que incide sobre un receptor es directamente proporcional a la potencia emisiva e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre el receptor y el punto que concentra el proceso de combustión, expresada mediante:

$$I = \frac{W_R}{4\pi x^2} \quad (4.1)$$

donde I : Intensidad de radiación incidente, W/m^2 .

W_R : Potencia emitida en forma de radiación, W .

x : Distancia desde el centro del incendio al objeto expuesto a la radiación, m .

La potencia radiante se estima como una fracción, η , de la potencia total, W , según:

$$W_R = \eta W \quad (4.2)$$

calculándose W de forma distinta según el tipo de incendio.

Algunos autores introducen en la ecuación 4.1 el coeficiente de transmisividad atmosférica, τ , (Mudan, 1984), tanto menor cuanto mayor sea la capacidad de absorción de la radiación por parte de la atmósfera, quedando la expresión de la intensidad radiante de la forma:

$$I = \frac{\tau \eta W}{4\pi x^2} \quad (4.3)$$

que es la que se utiliza en adelante.

A continuación se describen las metodologías de cálculo de la potencia calorífica generada en los incendios y de la transmisividad atmosférica. La fracción de energía radiante, η , se describe en el apartado 4.2.2 por ser un parámetro utilizado también en el modelo de llama sólida.

4.1.1. La potencia total generada en los incendios

La estimación de la potencia total generada en un incendio depende de la tipología del mismo.

4.1.1.2. Bolas de fuego

En este caso la potencia total se calcula considerando que toda la masa del contenedor, m , arde durante el incendio. El caudal másico que participa en la combustión se supone constante, obteniéndose mediante el cociente de la masa total y el tiempo de duración de la bola de fuego, t_{bf} , esto es:

$$W = \frac{m\Delta H_c}{t_{bf}} \quad (4.8)$$

que sustituida en 4.3 permite determinar la intensidad radiante:

$$I = \frac{\tau\eta m\Delta H_c}{t_{bf} 4\pi x^2} \quad (4.9)$$

En la bibliografía especializada se han publicado diversas expresiones para determinar los tiempos de duración de las bolas de fuego, relacionándolos en todos los casos con las masas totales implicadas en estos incendios. La expresión más utilizada es la propuesta por el CCPS (1989) y TNO (1985):

$$t_{bf} = 0.85m^{0.26} \quad (4.10)$$

donde m está expresada en kilogramos y t_{bf} en segundos. (Para masas de 20000 y 200000 kg se obtienen tiempos de duración de bolas de fuego de 11 y 20 segundos, respectivamente, lo que da idea de la corta duración del accidente, pero, por el contrario, de la enorme potencia desarrollada). Sustituyendo 4.10 en 4.9 se obtiene:

$$I = 9.3 \cdot 10^{-2} \frac{\tau\eta m^{0.74} \Delta H_c}{x^2} \quad (4.11)$$

si ΔH_c y x se expresan en J/kg y m, respectivamente, la intensidad viene expresada en W/m².

4.1.1.3. Dardos de fuego

La potencia total generada en este tipo de incendio se calcula a partir del caudal másico fugado, m^* :

$$W = m^* \Delta H_c \quad (4.12)$$

4.1.1.1. Incendios en charco o depósito

La potencia total se calcula a partir del caudal másico evaporado desde la superficie del líquido y la entalpía de combustión, suponiendo que la totalidad de sustancia se consume en el incendio, según la expresión:

$$W = m' S \Delta H_c \quad (4.4)$$

- donde m' : Caudal másico evaporado por unidad de superficie, $\text{kg/m}^2 \text{ s}$.
 ΔH_c : Entalpía de combustión, J/kg .
 S : Superficie del depósito o charco incendiado, m^2 .

Teniendo en cuenta la ecuación 4.4, la intensidad de radiación queda de la forma:

$$I = \frac{\tau \eta m' S \Delta H_c}{4\pi x^2} \quad (4.5)$$

Cuando el incendio se produce en un depósito debe tenerse en cuenta que su base efectiva se encuentra elevada sobre el suelo a una altura igual a la del tanque; en este caso la distancia x (ecuación 4.5) debe tomarse desde el centro geométrico del incendio, lo que obliga a determinar la altura media de las llamas (ver ecuaciones 4.27 y 4.28)

El caudal másico evaporado se calcula mediante las expresiones empíricas siguientes (TNO, 1997):

$$m' = \frac{10^{-3} \Delta H_c}{\Delta H_v} \quad (4.6)$$

para combustibles con temperatura de ebullición inferior a la ambiental, o bien:

$$m' = \frac{10^{-3} \Delta H_c}{\Delta H_v + c\Delta T} \quad (4.7)$$

si la temperatura de ebullición es superior a la del ambiente, siendo:

- ΔH_v : Entalpía de vaporización, J/kg .
 c : Calor específico del líquido, J/kg K .
 ΔT : Diferencia entre la temperatura de ebullición del líquido y la ambiental, K

El caudal másico depende del régimen de fuga (sónico o subsónico). El parámetro primario que permite conocer el régimen de fuga es el cociente de la presión exterior (atmosférica), P_{ext} , y la interior del contenedor, P_{int} . Dicha relación se compara con el denominado valor crítico, r_c , definido mediante:

$$r_c = (2/(\gamma + 1))^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (4.13)$$

donde γ es el cociente de los calores específicos del gas combustible a presión y volumen constante ($\gamma = c_p/c_v$), verificándose (Santamaría y Braña, 1994):

Régimen sónico: si $(P_{ext}/P_{int}) < r_c$. En este caso el caudal másico se calcula mediante:

$$m^* = F_c S_0 \sqrt{P_{int} \rho \gamma \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (4.14)$$

Régimen subsónico: si $(P_{ext}/P_{int}) \geq r_c$ utilizar la expresión siguiente:

$$m^* = F_c S_0 P_{int} \sqrt{\frac{2M_g}{RT_{int}} \left[\left(\frac{P_{ext}}{P_{int}} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_{ext}}{P_{int}} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \quad (4.15)$$

donde F_c : Coeficiente de descarga del orificio, adimensional.

S_0 : Área del orificio, m².

ρ : Densidad del gas en el interior del contenedor, kg/m³.

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

T_{int} : Temperatura del gas en el contenedor, K.

M_g : Masa molecular del gas, kg/kmol.

En la tabla 4.2 se indican los valores de γ para algunos gases combustibles (Perry, 1992) y los respectivos valores críticos (r_c).

TABLA 4.2. Valores de γ y r_c para algunos gases combustibles

Gas	$\gamma = c_p/c_v$	$r_c = (2/(\gamma + 1))^{\gamma/(\gamma-1)}$
Hidrógeno	1.41	0.53
Metano	1.11	0.58
Acetileno	1.26	0.55
Etileno	1.18	0.57
Etano	1.19	0.57
Isobutano	1.12	0.58
Pentano	1.09	0.59

A partir de los valores críticos de la tabla 4.2 se deduce que se alcanza el régimen sónico para presiones interiores relativamente bajas, del orden del doble que la atmosférica. Por ello, en la mayoría de los casos, al comenzar el accidente el régimen suele ser sónico y después, cuando P_{ext}/P_{int} disminuye por debajo del valor crítico, pasa a ser subsónico, aspecto que debe tenerse en cuenta en el cálculo.

Sustituyendo la ecuación 4.12 en 4.3 se obtiene:

$$I = \frac{\tau \eta m^* \Delta H_c}{4\pi x^2} \quad (4.16)$$

Para este tipo de incendio, el modelo de fuente puntual puede dar resultados que se aparten de los experimentales dado que la hipótesis de concentrar el incendio en un punto se aleja de la realidad geométrica, donde la longitud supera varias veces el diámetro y, por otro lado, la directividad del dardo (que depende de la posición del orificio de fuga) condiciona el daño, mucho mayor si la llama incide de forma directa sobre los elementos vulnerables del entorno que si no lo hace.

4.1.2. Coeficiente de transmisividad atmosférica

Los principales componentes del aire que absorben radiación térmica son el vapor de agua, el dióxido de carbono y la materia particulada, aunque se estima que la influencia de esta última es pequeña, por lo que las investigaciones se han dirigido a encontrar relaciones para los coeficientes de absorción de los dos primeros componentes.

A partir de los coeficientes de absorción (α) se define el coeficiente de transmisividad:

$$\tau = 1 - \alpha_w - \alpha_c \quad (4.17)$$

donde los subíndices "w" y "c" hacen referencia al vapor de agua y al dióxido de carbono, respectivamente.

En la bibliografía especializada se han publicado diversas expresiones empíricas para la determinación de τ , basadas en datos espectroscópicos reales –Howard (1962), Kruse (1962), Kyle (1969), Berstein (1979) y Oinas (1981)–, o en modelos más o menos complejos –Elder y Strong (1953), Raj (1977)–. Pero la propuesta de TNO (1985 y 1997) basada en el estudio de Hottel (1967) presenta la ventaja de relacionar el coeficiente de absorción con la distancia que separa el foco emisor (incendio) del receptor y con las presiones parciales del vapor de agua y del dióxido de carbono en aire. Dicha propuesta puede resumirse en la secuencia siguiente:

1. A partir de la humedad relativa y temperatura ambiente existentes se determina la presión parcial del vapor de agua en la atmósfera, P_w . La presión parcial normal del dióxido de carbono, P_c es 30 N/m²; este valor se utiliza en la mayoría de las ocasiones, dado que la concentración de dicho componente en las inmediaciones del escenario accidental no suele conocerse.
2. Utilizando las figuras 4.1 y 4.2 se obtienen los valores de α_w y α_c a partir de los respectivos productos $P_w x$ y $P_c x$, donde x es la distancia desde la superficie de la llama al objeto. En las figuras citadas se utiliza como parámetro la temperatura de la llama, generalmente desconocida, por lo que se propone utilizar un valor intermedio de 1200 K.

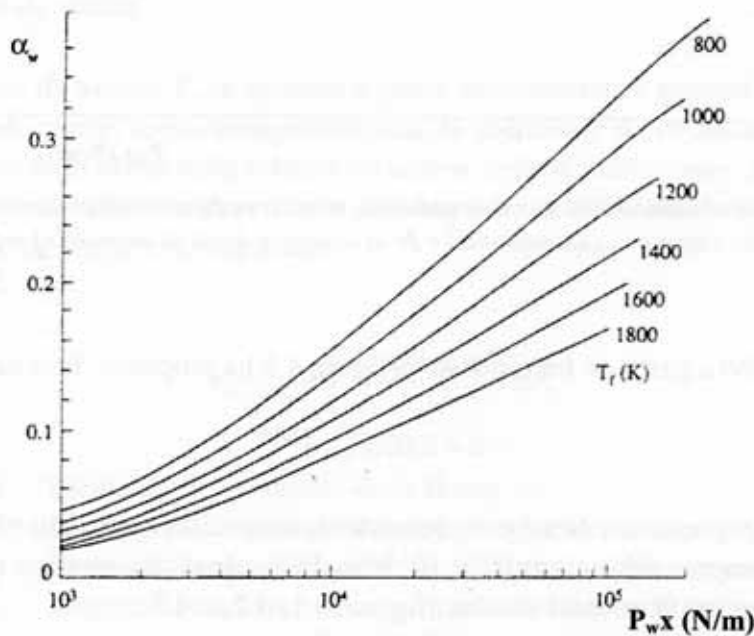


FIGURA 4.1. Coeficiente de absorción de la radiación térmica para el vapor de agua.

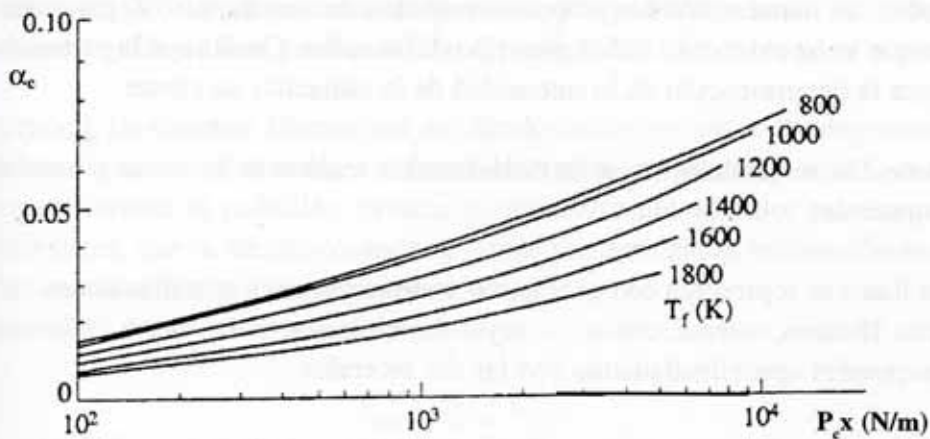


FIGURA 4.2. Coeficiente de absorción de la radiación térmica para el dióxido de carbono.

Una vez determinados α_w y α_c se obtiene τ por aplicación de la ecuación 4.17.

Dado que α_c es pequeño con relación a α_w puede despreciarse o considerarse un valor constante. De esta manera se puede operar con una función que relaciona directamente τ con el producto $P_w x$, tal y como se indica en la figura 4.3.

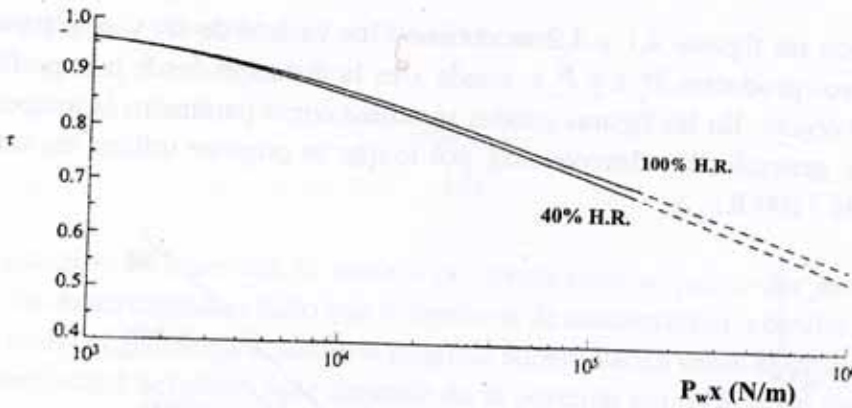


FIGURA 4.3. Transmisividad del aire a la radiación térmica en función del producto de la presión parcial del vapor de agua ambiental y de la distancia desde el incendio al receptor.

Bagster (1989) a partir de los datos de la figura 4.3 ha propuesto la ecuación siguiente:

$$\tau = 2.02(P_w x)^{-0.09} \quad (4.18)$$

donde P_w y x se expresan en N/m^2 y m , respectivamente. Esta expresión es aplicable para valores de $P_w x$ comprendidos entre 10^4 y 10^5 N/m . Fuera de dicho rango se recomienda utilizar las relaciones gráficas antes citadas (figuras 4.1, 4.2, o 4.3).

4.2. EL MODELO DE LLAMA SÓLIDA (MLLS)

El modelo de llama sólida fue propuesto inicialmente por Raj (1977) para incendios en charco, aunque se ha extendido a cualquier tipo de incendio. Constituye la metodología más rigurosa para la determinación de la intensidad de la radiación incidente.

Su idoneidad se fundamenta en la modelización realista de la llama y parte de los siguientes supuestos:

1. La llama se representa con geometrías tridimensionales sencillas –tales como cilindros, láminas, esferas, conos...–, cuyas dimensiones –base, altura, diámetro– se corresponden aproximadamente con las del incendio.
2. La energía radiante se emite uniformemente a través de la superficie exterior de la llama, considerando como emisor sólo la zona visible de la misma.

3. La intensidad de radiación térmica se calcula mediante la expresión:

$$I = \tau FE \tag{4.19}$$

donde: F : Factor de visión entre la llama y el objeto, adimensional.

E : Potencia emisiva específica de la llama, W/m^2 .

Dado que la transmisividad atmosférica ha sido comentada en el apartado 4.1.2, se describen a continuación los factores de visión y la potencia emisiva específica.

4.2.1. Factores de visión

Los factores de visión, F , se estiman a partir de expresiones generalmente complejas, que dependen de ciertas relaciones geométricas de la llama y de la distancia al objeto expuesto, así como de la orientación relativa de ambos, definiéndose como "las fracciones del espacio de visión del objeto expuesto que son ocupadas por la llama". Su valor se deduce a partir de la ecuación general siguiente:

$$F_{S_1 \rightarrow dS_2} = \int_{S_1} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{x^2} dS_1 \tag{4.20}$$

donde: dS_1 : Elemento de superficie de la llama, m^2 .

dS_2 : Elemento de superficie del objeto expuesto, m^2 .

x : Distancia desde el borde de las llamas al objeto expuesto, m .

θ_1 : Angulo formado por la superficie de la llama y la perpendicular al suelo.

θ_2 : Angulo formado por la superficie del objeto expuesto y la perpendicular al suelo.

Dada la dificultad de integración de la ecuación 4.20 al aplicarla a casos concretos, se estima bien mediante cálculo numérico (*Sparrow y Cess, 1978 y Davis y Bagster, 1989*) o por tratamiento gráfico (*Rein y cols, 1970 y Howell, 1982*).

En general, las distintas alternativas de cálculo distinguen entre dos disposiciones límites del objeto expuesto con relación a la llama: Horizontal y vertical, pero el factor de visión utilizado para estimar la radiación térmica es, generalmente, el valor máximo entre estas dos orientaciones, que se alcanza cuando el objeto presenta cierta inclinación respecto a la horizontal, aceptándose la siguiente expresión:

$$F_{max} = \sqrt{F_h^2 + F_v^2} \tag{4.21}$$

donde F_{max} : Factor de visión máximo, adimensional.
 F_h : Factor de visión horizontal, adimensional.
 F_v : Factor de visión vertical, adimensional.

Se han publicado numerosas expresiones para el cálculo de estos factores, cuya formulación es diferente para cada tipo de incendio, debido a la configuración geométrica seleccionada para cada accidente e intensidad de viento reinante, que puede producir la inclinación de la llama.

4.2.1.1. Incendios en charco o depósito

El modelo de llama sólida suele configurarse como un cilindro cuya base corresponde a la superficie del charco, considerada circular, y su altura es la alcanzada por las llamas, figura 4.4.

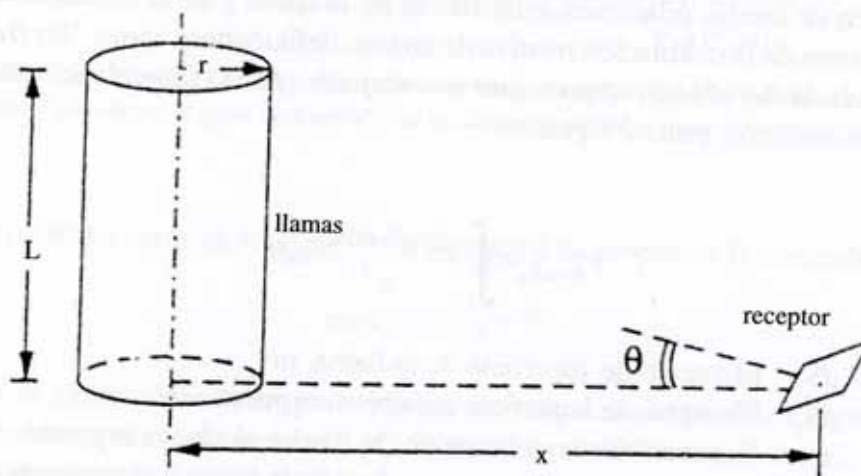


FIGURA 4.4. Idealización de un incendio en charco mediante un cilindro. Las dimensiones indicadas sirven para establecer los factores de visión.

Entre las distintas expresiones disponibles para **situaciones de calma** –Hamilton y Morgan (1952), Rein y cols (1970), Sparrow (1973), Raj y Kalelkar (1974), Raj (1977), Stannard (1977)–, las más usadas son las propuestas por Raj (1977), adoptadas por TNO (1997), que se indican a continuación con la ayuda de la figura 4.4.

Se parte de los parámetros siguientes:

$$h_r = L/r$$

$$x_r = x/r$$

$$A_1 = (x_r + 1)^2 + h_r^2$$

$$B_1 = (x_r - 1)^2 + h_r^2$$

El factor de visión para un receptor plano horizontal situado en el suelo ($\theta = \pi/2$) se expresa mediante:

$$F_h = \frac{1}{\pi} \left(\tan^{-1} \sqrt{\frac{x_r + 1}{x_r - 1}} - \left(\frac{x_r^2 - 1 + h_r^2}{\sqrt{A_1 B_1}} \right) \tan^{-1} \sqrt{\frac{(x_r - 1)A_1}{(x_r + 1)B_1}} \right) \quad (4.22)$$

y para un receptor plano vertical situado en el suelo ($\theta = 0$):

$$F_v = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{x_r} \tan^{-1} \left(\frac{h_r}{\sqrt{x_r^2 - 1}} \right) + \left(\frac{h_r (A_1 - 2x_r)}{x_r \sqrt{A_1 B_1}} \right) \tan^{-1} \sqrt{\frac{(x_r - 1)A_1}{(x_r + 1)B_1}} - \frac{h_r}{x_r} \tan^{-1} \sqrt{\frac{x_r - 1}{x_r + 1}} \right) \quad (4.23)$$

En la figura 4.5 se ha representado el factor máximo de visión (ecuación 4.21) en función de h_r y x_r , donde se observa que dicho factor toma un valor máximo próximo a 0.7, disminuyendo rápidamente conforme aumenta la distancia desde el incendio al receptor.

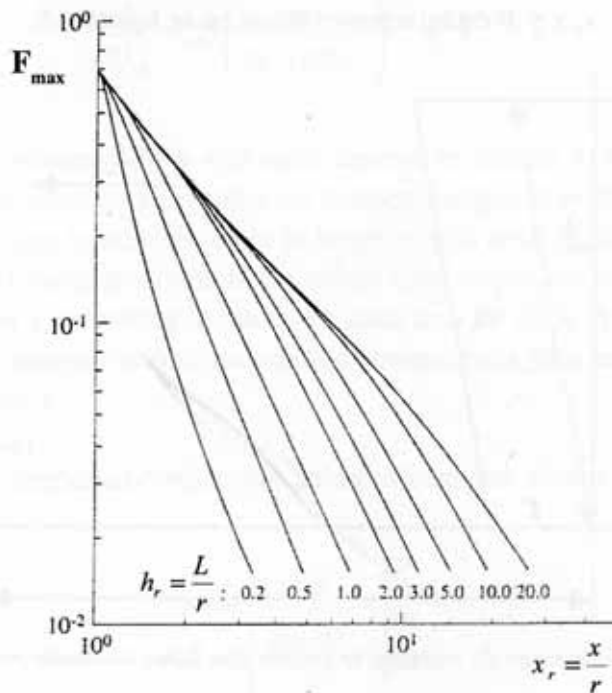


FIGURA 4.5. Factor de visión máximo aplicable a un incendio en charco en función de los parámetros x_r y h_r

Para situaciones con **presencia de viento**, figura 4.6, se han publicado diversas relaciones destacando las debidas a *Stannard (1977)*, *Mudan (1987)* o *Atallah (1990)*; *TNO (1997)* utiliza éstas últimas:

Factor de visión para la orientación vertical:

$$\pi F_v = -E_1 \tan^{-1} D_1 + E_1 \left(\frac{h_r^2 + (x_r + 1)^2 - 2h_r(1 + x_r \text{sen}\theta)}{A_2 B_2} \right) \tan^{-1} \left(\frac{A_2 D_1}{B_2} \right) + \frac{\cos\theta}{C_1} \tan^{-1} \left(\frac{h_r x_r - F_1^2 \text{sen}\theta}{F_1 C_1} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{F_1 \text{sen}\theta}{C_1} \right) \quad (4.24)$$

Factor de visión para la orientación horizontal:

$$\pi F_h = \tan^{-1} \left(\frac{1}{D_1} \right) + \frac{\text{sen}\theta}{C_1} \left(\tan^{-1} \left(\frac{h_r x_r - F_1^2 \text{sen}\theta}{F_1 C_1} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{F_1 \text{sen}\theta}{C_1} \right) \right) \left(\frac{h_r^2 + (x_r + 1)^2 - 2(x_r + 1 + h_r \text{sen}\theta)}{A_2 B_2} \right) \tan^{-1} \left(\frac{A_2 D_1}{B_2} \right) \quad (4.25)$$

donde

$$\begin{aligned} A_2 &= \sqrt{(h_r^2 + (x_r + 1)^2 - 2h_r(x_r + 1)\text{sen}\theta)} & B_2 &= \sqrt{(h_r^2 + (x_r - 1)^2 - 2h_r(x_r - 1)\text{sen}\theta)} \\ C_1 &= \sqrt{(1 + (x_r^2 - 1)\cos\theta)} & D_1 &= \sqrt{((x_r - 1)/(x_r + 1))} \\ E_1 &= (h_r \cos\theta)/(x_r - h_r \text{sen}\theta) & F_1 &= \sqrt{(x_r^2 - 1)} \end{aligned}$$

Los parámetros L , r , x y θ están representados en la figura 4.6.

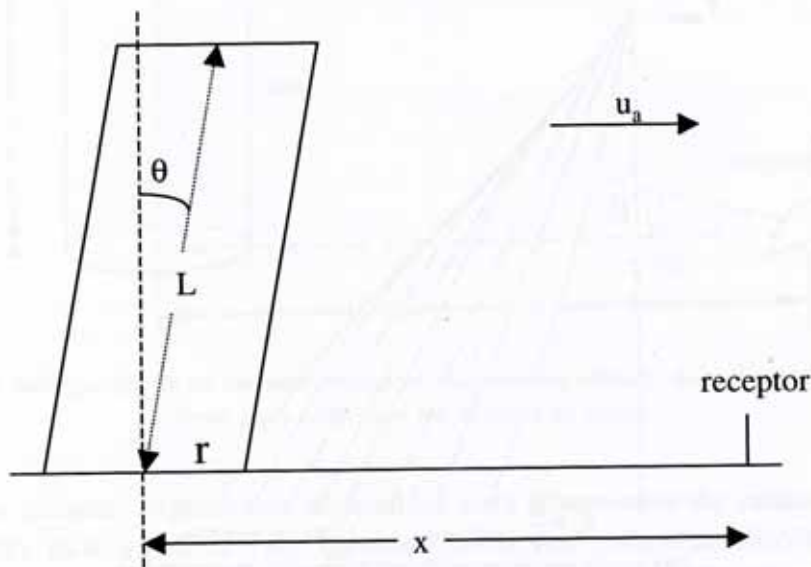


FIGURA 4.6. Modelo geométrico de incendio en charco con llama inclinada por la acción del viento.

Para resolver cualquiera de los casos anteriores es necesario conocer el diámetro del charco o depósito, la altura e inclinación de las llamas.

En general, la determinación del diámetro de cualquier charco contenido (mediante cubetos, estructuras o accidentes orográficos que impidan su extensión) se lleva a cabo a través del diámetro equivalente:

$$D_{ch} = \sqrt{\frac{4V_l}{\pi\delta}} \quad (4.26)$$

donde V_l y δ representan el volumen de líquido fugado y el espesor sobre el suelo. Cabe indicar que la ecuación anterior es muy simplista, dado que la extensión, forma y altura del charco está condicionada por la permeabilidad e inclinación del terreno y la velocidad de permeación y evaporación, por lo que las hipótesis estimativas in situ conducen a resultados mas realistas que los derivados de ecuaciones que difícilmente pueden recoger los parámetros antes citados.

Para determinar la altura de la llama se recurre a expresiones empíricas, siendo las más utilizadas las propuestas por *Thomas*, tanto para condiciones de calma (1963):

$$\frac{L}{D_{ch}} = 42 \left(\frac{m'}{\rho_a \sqrt{gD_{ch}}} \right)^{0.61} \tag{4.27}$$

como de viento (1965):

$$\frac{L}{D_{ch}} = 55 \left(\frac{m'}{\rho_a \sqrt{gD_{ch}}} \right)^{0.67} (v^*)^{-0.21} \tag{4.28}$$

(Para utilizar las ecuaciones 4.27 y 4.28 debe tenerse en cuenta lo siguiente: a) Cuando la base del incendio sea rectangular, el valor del diámetro se puede estimar como el del círculo equivalente, siempre que la relación entre la longitud y la anchura del charco sea inferior a 2. Si se excede dicho valor, se divide la superficie total implicada en rectángulos que verifiquen esta condición y se estima la altura en cada uno de ellos. b) La expresión ha sido deducida a partir de ensayos piloto, no estando comprobada para incendios con diámetros superiores a 25 metros.)

El factor v^* se denomina “velocidad adimensional del viento”, cuya expresión es la siguiente:

$$v^* = \frac{u_a}{\left(\frac{gm'D_{ch}}{\rho_a} \right)^{1/3}} \tag{4.29}$$

donde u_a es la velocidad real del viento.

El viento puede provocar la inclinación de la llama, definida por el ángulo formado por el lado de la llama y la vertical, θ (ver figura 4.6). Se han propuesto varias expresiones para determinar el citado ángulo, siendo la publicada por la *American Gas Association* (1974) la que conduce a los resultados más concordantes con los experimentales:

$$\cos \theta = 1 \quad \text{si } v^* < 1 \quad (4.30a)$$

$$\cos \theta = \frac{1}{\sqrt{v^*}} \quad \text{si } v^* \geq 1 \quad (4.30b)$$

Otras expresiones, como la utilizada por *TNO (1997)*, derivan de la propuesta por *Welker y Sliepcevich (1966)*:

$$\frac{\tan \theta}{\cos \theta} = 3.3 Re^{0.07} Fr^{0.8} \left(\frac{\rho_v}{\rho_a} \right)^{-0.6} \quad (4.31)$$

siendo *Re* y *Fr* los números de Reynolds y Froude, respectivamente.

$$Re = \frac{D_{ch} u_a}{\nu_a} \quad (4.32)$$

$$Fr = \frac{u_a^2}{g D_{ch}} \quad (4.33)$$

donde ν_a es la viscosidad cinemática del aire, m^2/s , y ρ_v la densidad del combustible en fase gas, a la presión y temperatura ambiente.

4.2.1.2. Bolas de fuego

El modelo de llama sólida representa las bolas de fuego como esferas, cuyos radio, r_{bf} , y alturas sobre el suelo, H_{bf} , (ver figura 4.7) se determinan mediante las ecuaciones empíricas siguientes:

$$r_{bf} = 3.24 m_{bf}^{0.325} \quad (4.34)$$

$$H_{bf} = 2r_{bf} \quad (4.35)$$

donde m_{bf} es la masa total de combustible, expresada en kg.

En este caso, el factor de visión se determina mediante una expresión muy sencilla, dado que la forma en la que el objeto "ve" a la bola de fuego es siempre circular –*Gebhart (1971)*–:

$$F_{bf} = \left(\frac{r_{bf}}{X_{bf}} \right)^2 \quad (4.36)$$

donde X_{bf} es la distancia desde el receptor al centro de la bola.

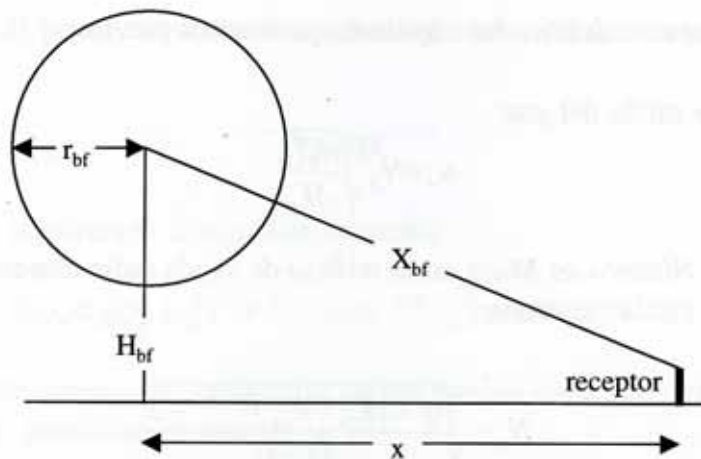


FIGURA 4.7. Modelo de bola de fuego y parámetros característicos.

4.2.1.3. Dardos de fuego

Los factores de visión utilizados en los dardos de fuego son los indicados para los incendios en charco con llamas inclinadas (ecuaciones 4.24 y 4.25) pero la determinación de los parámetros geométricos (longitud y diámetro medio del dardo) presenta una notable complejidad y los resultados obtenidos no están exentos de incertidumbres, dado el empirismo y limitaciones de algunas expresiones necesarias para calcular los parámetros citados.

A continuación se describe la secuencia básica de cálculo. Si es necesario una mayor concreción debe consultarse la propuesta de Chamberlain (1987), que es la adoptada por TNO (1997).

En la figura 4.8 se representa el dardo modelizado como un tronco de cono de longitud L_d y diámetros D_{d1} y D_{d2} . La llama se inicia a cierta distancia del orificio, L^* (longitud de despegue), y puede desviarse de la dirección inicial del chorro en función de la velocidad del viento (u_a) y de la fluidodinámica de la llama.

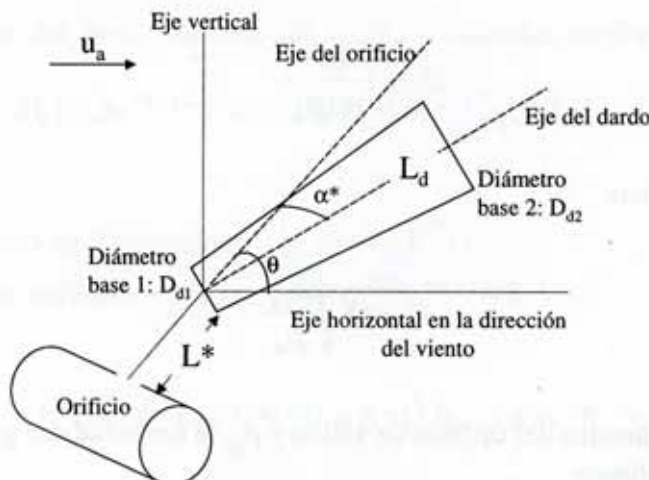


FIGURA 4.8. Modelo de dardo de fuego, representado por un tronco de cono, desviado del eje del orificio por la acción del viento.

En primer lugar se definen los siguientes parámetros previos:

1. Velocidad de salida del gas:

$$u_d = N_d \sqrt{\frac{\gamma R T_d}{M_g}} \quad (4.37)$$

donde: N_d : Número de Mach en el orificio de salida (adimensional) que viene dado por la expresión:

$$N_d = \sqrt{\frac{(\gamma + 1) \left(\frac{P_e}{P_{ext}} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 2}{(\gamma - 1)}} \quad (4.38)$$

P_e es la presión estática en el plano del orificio de salida que se determina mediante:

$$P_e = P_{int} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (4.39)$$

T_d : Temperatura del gas expansionado a la salida del orificio, que se calcula mediante:

$$T_d = T_{int} \left(\frac{P_{ext}}{P_{int}} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \quad (4.40)$$

2. Diámetro efectivo de la fuente, D_f , definido como el diámetro de un orificio imaginario a través del cual sale aire con el caudal másico del gas (m^*). Para flujo subsónico:

$$D_f = \sqrt{\frac{4m^*}{\pi \rho_a u_d}} \quad (4.41)$$

Si el flujo es sónico:

$$D_f = D_0 \sqrt{\frac{\rho_{g0}}{\rho_a}} \quad (4.42)$$

donde D_0 es el diámetro del orificio de salida y ρ_{g0} la densidad del gas en el dardo, que se determina mediante:

$$\rho_{g0} = P_c M_g / (R T_d) \quad (4.43)$$

Determinado D_f puede calcularse la longitud del dardo, que en aire en calma se expresa mediante:

$$L_{d0} = Y D_f \tag{4.44}$$

donde Y se obtiene resolviendo la siguiente ecuación:

$$0.024(g D_f / u_d^2)^{1/3} Y^{5/3} + 0.2 Y^{2/3} - (2.85 / W^*)^{2/3} = 0 \tag{4.45}$$

siendo W^* la fracción másica del combustible en una mezcla estequiométrica con aire. Si se trata de un producto parafínico se tiene:

$$W^* = M_g / (15.82 M_g + 0.0395) \tag{4.46}$$

Con L_{d0} se determina la longitud total del dardo, L_d^* , definido como la distancia desde el centro del orificio al extremo exterior de la llama:

$$L_d^* = L_{d0} (0.51 e^{(-0.4u_a)} + 0.49) (1 - 6.07 \cdot 10^{-3} (\theta - 90^\circ)) \tag{4.47}$$

donde θ es el ángulo formado por el eje del orificio y la dirección del viento en el plano horizontal (ver figura 4.8).

La distancia de despegue, L^* se calcula mediante:

$$L^* = (0.185 e^{(-20u_a / u_d)} + 0.015) L_d^* \tag{4.48}$$

Para determinar la longitud efectiva del dardo, L_d , se debe calcular el ángulo de desviación del dardo respecto al eje del orificio, α^* , aunque desde el punto de vista práctico se puede suponer que $L_d \approx L_d^* - L^*$.

Los diámetros del tronco de cono, D_{d1} y D_{d2} se calculan mediante:

$$D_{d1} = D_f (13.5 e^{-(u_a / u_d)} + 1.5) (1 - (\sqrt{1 - \rho_a / \rho_{g0}}) / 15) e^{-70 R_{i1} C' u_a / u_d} \tag{4.49}$$

donde R_{i1} : Número de Richardson: $(g / (D_f^2 u_d^2))^{1/3} D_f$ (4.49a)

C' : Factor definido mediante: $10^3 e^{-100u_a / u_d} + 0.8$ (4.49b)

$$D_{d2} = L_d^* (0.18 e^{-1.5(u_a / u_d)} + 0.31) (1 - 0.47 e^{-25u_a / u_d}) \tag{4.50}$$

Finalmente, para determinar el área total del tronco de cono, S_c , se determina el diámetro medio:

$$D_{dm} = \frac{D_{d1} + D_{d2}}{2} \quad (4.51)$$

y se modeliza como un cilindro con diámetro D_{dm} , de manera que se verifica:

$$S_c = \pi \frac{D_{dm}^2}{2} + \pi D_{dm} L_d = \pi D_{dm} \left(\frac{D_{dm}}{2} + L_d \right) \quad (4.52)$$

4.2.2. La potencia de emisión de la radiación térmica

Cualquier cuerpo a temperatura T emite radiación térmica que se determina mediante la ley de Stefan-Boltzmann; la potencia neta (emitida-recibida) por unidad de superficie, E , puede expresarse mediante:

$$E = \varepsilon \sigma (T_e^4 - T_r^4) \quad (4.53)$$

donde: ε : Coeficiente de emisión, adimensional.

σ : Constante de Stefan-Boltzmann, W/m^2K^4 .

T_e : Temperatura del emisor, K.

T_r : Temperatura del receptor, K.

En los incendios, la radiación térmica procede de dos fuentes: de los gases generados en la combustión (principalmente del dióxido de carbono y del vapor de agua) y del humo (producido como consecuencia de la descomposición térmica y oxidación parcial del combustible)

Desafortunadamente la ecuación 4.53 no es útil para determinar la potencia emisiva, dado que los parámetros ε y T_e (en este caso T_e es la temperatura de la llama) no son generalmente conocidos. En primer lugar, no parece probable que las llamas se comporten como cuerpos negros ($\varepsilon = 1$), dado que si lo fueran se obtendrían valores de E muy superiores a los experimentales. Por otro lado, la temperatura de la llama no es uniforme en toda la superficie, de manera que puede considerarse la existencia de dos emisores: los destellos, que se producen cuando la combustión es completa, provocando un elevado nivel de radiación, y el humo que origina un efecto "pantalla" a la emisión de los destellos interiores.

Por todo ello, desde el punto de vista práctico, se plantea el cálculo de la potencia emisiva como una fracción de la potencia calorífica térmica máxima desarrollada en el incendio:

$$E = \frac{\eta W}{S_{ext}} \quad (4.54)$$

donde S_{ext} es la superficie exterior de las llamas, considerada como la que corresponde a su parte visible.

El parámetro E es el que presenta el mayor nivel de incertidumbre para la determinación final de la intensidad térmica.

4.2.2.1. Incendios en charco o depósito

En estos casos las mezclas combustible vaporizado-aire se apartan considerablemente de la idealidad. Dada la elevada temperatura alcanzada por los productos de la combustión, se forma una intensa corriente convectiva vertical que solamente posibilita el acceso del aire a la zona de combustión a través de la superficie lateral de las llamas. El aire de entrada se mezcla con el vapor combustible y se consume en las zonas más próximas a los límites exteriores del incendio, por lo que el aporte de oxígeno a la zona central es muy escaso. Como consecuencia de ello, la composición de los productos finales es muy compleja, configurada por los precursores, productos de craqueo parcialmente quemados (humos) y los gases derivados de la combustión (dióxido de carbono, vapor de agua, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno,...) Desde el punto de vista de la emisión radiante coexisten dos zonas: los destellos, donde el proceso de combustión se realiza adecuadamente (alcanzando temperaturas de 1200 a 1400 K) y los humos (donde la temperatura no supera 800 K). En general se admite que los humos ocupan la mayor parte de la superficie emisiva, sobre el 80%, y los destellos no superan el 20%. Este comportamiento justifica la propuesta de la NASA (1979):

$$E = 0.2E_d - 0.8E_h \quad (4.55)$$

donde E_d y E_h son las emisiones específicas (W/m^2) de los destellos y del humo, respectivamente, y los factores numéricos representan las fracciones de las superficies antes citadas. Hagglund y Persson (1976) han encontrado para los humos una emisión de $20000 W/m^2$. Para los hidrocarburos habituales, la NASA (1979) propone un valor medio de E_d de $130000 W/m^2$. Con estos datos, aplicados a la ecuación 4.55, resulta una emisión global media de $42000 W/m^2$.

Desafortunadamente sólo se disponen de valores experimentales de potencias emisivas para incendios de pequeños diámetros (ver tabla 4.3); por otro lado, los escasos datos disponibles para grandes diámetros demuestran una gran dispersión de resultados, lo que justifica la incertidumbre antes citada.

Mudan (1984) utiliza datos obtenidos con gasoil, queroseno y JP-5, encontrando una correlación entre la potencia emisiva y el diámetro del charco, D_{ch} , expresada mediante:

$$E = 140000 \cdot 0.887^{D_{ch}} + 20000(1 - 0.887^{D_{ch}}) \quad (4.56)$$

La ecuación 4.56 está de acuerdo con los comentarios antes realizados sobre la menor posibilidad de acceso del aire al interior del incendio conforme aumenta el diámetro, lo que afecta a la eficacia de la combustión y, por consiguiente, a la potencia emisiva, aspecto corroborado por Fu (1971), Hagglund y Person (1976) y Johnson (1992).

Otros autores expresan el valor de E_d (ver ecuación 4.55) como una fracción de la energía radiante máxima, que es la que corresponde a la combustión total de producto:

$$E_d = \frac{\eta m' \Delta H_c}{S_{ext}} \quad (4.57)$$

donde S es la superficie del charco y S_{ext} el área superior y lateral del incendio. Si se supone un charco circular se verifica:

$$E_d = \frac{\eta m' \Delta H_c}{1 + 4L/D_{ch}} \quad (4.58)$$

donde L/D_{ch} se calcula mediante las expresiones de *Thomas (1963 y 1965)*, antes indicadas (ecuaciones 4.27 y 4.28)

Con relación a la ecuación 4.58, el valor de L corresponde a la altura de la parte visible de la llama. Cabe indicar que también emite energía radiante la zona situada sobre las llamas debido a la elevada temperatura de los productos de la combustión, pero, en general, dicha emisión representa una pequeña fracción (sobre el 10%) de la emitida por la zona visible y no suele tenerse en cuenta.

La tabla 4.3 recoge algunos valores de η para varios productos y diámetros recopilados por *Burguess y Hertzberg (1974)* donde puede observarse la disparidad de los datos encontrados, situados en el rango 0.1-0.4.

TABLA 4.3. Fracciones de energía radiante para incendios de hidrocarburos (*Burguess y Hertzberg, 1974*)

Hidrocarburos	Diámetro charco, m	η
Metanol	0.076	0.162
	0.152	0.165
	1.22	0.177
Metano	0.305	0.21
	0.76	0.23
	1.53	0.15-0.24
	3.05	0.24-0.34
	6.10	0.20-0.27
Butano	0.305	0.199
	0.457	0.205
	0.76	0.269
Gasolina	1.22	0.30-0.40
	1.53	0.16-0.27
	3.05	0.13-0.14
Benceno	0.076	0.35
	0.457	0.345
	0.76	0.350
	1.22	0.360

4.2.2.2. Bolas de fuego

Para las bolas de fuego, la estimación de la potencia emisiva específica plantea los mismos problemas que para los incendios en charco o depósito, aunque en este caso, este parámetro alcanza valores mayores como consecuencia de un mejor proceso de combustión, lo que permite alcanzar mayores temperaturas.

Prugh (1994) relaciona E con la temperatura de la llama, T_e , mediante la ecuación de Stefan-Boltzmann:

$$E = 5.67 \cdot 10^{-8} T_e^4 \quad (4.59)$$

donde no se tiene en cuenta la temperatura del receptor, considerada despreciable, y se asigna el valor unidad a la emisividad. Partiendo del trabajo de *Baumeister (1978)*, que relaciona el color de la llama con la temperatura de la misma, *Prugh* considera una temperatura media de 1373 K en la superficie, lo que proporciona un valor de E próximo a 200 kW/m², determinado a partir de la ecuación 4.59. En todo caso, dicho autor propone calcular la temperatura de la llama mediante:

$$T_e = \frac{\Delta H_c}{c_{gc}} + T_0 \quad (4.60)$$

donde c_{gc} es calor específico medio de los gases de combustión.

No obstante, la ecuación más utilizada es la siguiente:

$$E = \frac{\eta m \Delta H_c}{\pi D_{bf}^2 t_{bf}} \quad (4.61)$$

propuesta por el *CCPS (1989)*, aunque el principal inconveniente vuelve a ser el parámetro η , que para este tipo de incendios varía de 0.25 a 0.4, sin que se pueda asignar un valor determinado a cada caso.

El tiempo de duración de la bola de fuego puede determinarse mediante la ecuación 4.10 y para el diámetro máximo se utiliza la siguiente expresión, propuesta por *TNO (1985)* y por *CCPS (1989)*:

$$D_{bf} = 6.48 m^{0.325} \quad (4.62)$$

Sustituyendo 4.10 y 4.62 en 4.61 se obtiene:

$$E = 8.9 \cdot 10^{-3} \eta \Delta H_c m^{0.09} \quad (4.63)$$

donde E viene dada en W/m^2 cuando ΔH_c y m se expresan en J/kg y kg , respectivamente. Aplicando la ecuación 4.63 a sustancias y masas habitualmente almacenadas en instalaciones industriales, suponiendo un valor intermedio para η de 0.33, se obtienen potencias emisivas específicas del orden de 300 kW/m^2 .

Roberts (1982) relaciona la fracción de emisión con la presión de vapor del combustible en el momento de la fuga, P_{int} (en N/m^2), mediante:

$$\eta = 3.25P_{int}^{0.32} \quad (4.64)$$

expresión que ha sido adoptada por *TNO (1997)*.

Los datos experimentales sobre las potencias emisivas específicas son escasos, estando dentro del intervalo comprendido entre 250 y 350 kW/m^2 —*Johnson y Pritchard (1990)*—, aunque *Hardee y Lee (1978)* proponen valores de hasta 500 kW/m^2 .

4.2.2.3. Dardos de fuego

La única referencia específica encontrada en relación a la potencia de emisión de los dardos de fuego es la propuesta por *TNO (1997)*, expresada a través de la fracción de energía radiante:

$$\eta = 0.21 e^{-0.00323u_d} + 0.11 \quad (4.65)$$

donde u_d es la velocidad de gas a través del orificio.

Con relación a la ecuación 4.65 se observa que para velocidades de salida (u_d) pequeñas el factor $e^{-0.00323u_d}$ es próximo a la unidad, tomando η valores cercanos al máximo (0.32). Conforme aumenta u_d , η disminuye; así, para una velocidad próxima al régimen sónico (suponiendo $u_d \approx 350 \text{ m/s}$) se obtiene un valor de η de 0.18, lo que significa que al comenzar el proceso la emisión energética específica tiene el valor más pequeño y conforme disminuye la presión interior (con la consiguiente disminución de la velocidad de salida) aumenta η . No obstante, debe tenerse en cuenta que al disminuir la velocidad de salida también lo hace el dardo y, por consiguiente, disminuye el área de emisión, por lo que la intensidad (τFE) puede considerarse aproximadamente constante durante la mayor parte del tiempo de duración del incendio.

4.3. DOSIS DE RADIACIÓN TÉRMICA

Como se indicó en el capítulo 3, la ecuación mayoritariamente aceptada para calcular la dosis de radiación térmica recibida por los seres humanos expuestos a cualquier tipo de incendio es la siguiente:

$$D = I^{4/3} t_e \quad (3.1)$$

donde D : Dosis de radiación recibida, $(W/m^2)^{4/3}s$.
 I : Intensidad de radiación térmica, W/m^2 .
 t_e : Tiempo de exposición, s.

Expresada de esta forma, la ecuación 3.1 es válida para un régimen estacionario cuando el foco emisor sea fijo y los afectados permanezcan inmóviles. Sin embargo, la primera suposición no se verifica en todos los incendios considerados, (concretamente, las bolas de fuego constituyen sistemas en movimiento), y en cuanto a la segunda, es de suponer que los afectados intentarán alejarse del foco del incendio, hasta encontrar protección o salir de la zona peligrosa. Teniendo en cuenta lo anterior, la ecuación 3.1 se debe expresar de la forma:

$$D = \int_0^{t_e} I^{4/3} dt \quad (4.66)$$

Para resolver la ecuación 4.66, debe expresarse la intensidad de radiación en función de la posición a la que se encuentra el sujeto respecto al incendio y, a su vez, relacionar la posición con el tiempo de exposición. En este sentido, *TNO (1989)* propone un modelo de "comportamiento de la población frente los incendios" –aplicados a los de charco o depósito– cuyas hipótesis son las siguientes:

1. Al iniciarse el incendio los afectados permanecen estáticos unos instantes, sorprendidos por el accidente. Suponiendo que la intensidad alcanza rápidamente un valor constante, I_0 , la dosis, D_r , durante el periodo citado, denominado de "reacción", t_r , establecido en 5s, es la siguiente:

$$D_r = I_0^{4/3} t_r \quad (4.67)$$

2. Transcurrido el tiempo de reacción, los afectados huyen rápidamente del incendio (fase de escape) a una velocidad media de 4 m/s. En esta etapa, la dosis, D_{esc} , no permanece constante, ya que la intensidad disminuye conforme aumenta la distancia del receptor al incendio. En estas condiciones:

$$D_{esc} = \int_0^{t_{esc}} I^{4/3} dt \quad (4.68)$$

De esta forma, la dosis total se puede calcular como contribución aditiva de las dos ecuaciones anteriores:

$$D = D_r + D_{esc} = I_0^{4/3} 5 + \int_0^{t_{esc}} I^{4/3} dt \quad (4.69)$$

3. Para relacionar la intensidad y la distancia de separación al receptor, TNO utiliza el modelo de fuente puntual (MFP), obteniendo la expresión final siguiente:

$$D = I_0^{4/3} \left(5 + (3x_0 / 20) \left(1 - \left(1 + \frac{4}{x_0} t_e \right)^{-5/3} \right) \right) \quad (4.70)$$

donde x_0 es la distancia respecto al incendio a la que se encuentra el sujeto en el momento de iniciarse el accidente. Cada valor de x_0 lleva asociado un valor de I_0 que puede calcularse mediante el MFP; por consiguiente, conocido x_0 y el tiempo de escape disponible, t_e , (para acceder a una zona protegida o salir de la zona peligrosa) se puede determinar la dosis recibida por aplicación de la ecuación 4.70.

Con relación a la última hipótesis, cabe indicar que la utilización del MFP puede proporcionar valores intensidad-distancia que se apartan de la realidad experimental, sobre todo en las zonas más próximas a los incendios. Para resolver este inconveniente, se podría considerar la posibilidad de utilizar el modelo de llama sólida (MLIS) en lugar del MFP, pero la complejidad de los factores de visión dificultaría extraordinariamente la integración de la ecuación 4.69. En este sentido, el Grupo de Investigación de Seguridad e Higiene en la Industria de la Universidad de Murcia, aplicando el MLIS a los incendios en charco y bolas de fuego y evaluando las relaciones de la intensidad de radiación y la distancia incendio-receptor, ha comprobado que ambos parámetros pueden relacionarse mediante una expresión potencial del tipo (Navarro, 2000):

$$I = \frac{A^*}{x^a} \quad (4.71)$$

donde A^* y a son parámetros de ajuste que dependen del tipo y características del incendio.

Los dardos de fuego no siguen la ecuación 4.71, aproximándose más a una expresión exponencial, en la forma:

$$I = A_{df} e^{b_{df} x} \quad (4.72)$$

donde A_{df} y b_{df} son parámetros de ajuste.

4.3.1. Propuesta para determinar las dosis de radiación térmica

Considerando los comentarios anteriores, se propone a continuación una metodología para determinar las dosis de radiación:

1. Con relación al tiempo de duración de los incendios, se subdividen en dos categorías: de corta duración, inferiores a un minuto, y de media o larga duración, cuando superan dicho tiempo.

2. En los incendios de corta duración se hace coincidir el tiempo de exposición con la duración del incendio (t_d) y se supone que los individuos permanecen estáticos durante dicho período. Esta hipótesis da resultados muy similares a los obtenidos considerando la acción de escape, lo que presenta la ventaja de simplificar la metodología de cálculo, como se indica en el capítulo 6 (apartado 6.3.6). Por consiguiente, la dosis puede expresarse mediante:

$$D = I^{4/3} t_d \tag{4.73}$$

3. Para los incendios de media o larga duración se aplica el modelo de “comportamiento de la población frente a los incendios”, antes comentado, pero partiendo de las relaciones intensidad-distancia obtenidas con el MLIS (ecuación 4.71). Si el procedimiento se utiliza para establecer las zonas de planificación, la intensidad máxima a considerar no suele ser superior a 10 kW/m². Por otro lado, debe encontrarse la posición que corresponde a 1.7 kW/m²; las zonas con intensidades inferiores a este valor se consideran seguras, de manera que las personas situadas en ellas pueden estar expuestas durante prolongados períodos de tiempo sin sufrir daño, tal y como se comenta en el capítulo 3.

Cabe distinguir dos casos:

- 3.1. Para los incendios en charco y bolas de fuego se utiliza la ecuación 4.71, que se sustituye en la 4.69, obteniéndose:

$$D = \left(\frac{A^*}{x_0^a}\right)^{4/3} 5 + \int_0^{t_{esc}} \left(\frac{A^*}{x^a}\right)^{4/3} dt \tag{4.74}$$

Para integrar la ecuación 4.74 debe tenerse en cuenta las relaciones siguientes:

Para $t = 0$ se verifica: $x = x_0$ e $I = I_0$

$$t_{esc} = \frac{x_{1.7} - x_0}{4} \tag{4.75}$$

$$dt = \frac{dx}{4} \tag{4.76}$$

donde $x_{1.7}$ es la posición donde la intensidad es 1.7 kW/m². Sustituyendo (4.75) y (4.76) en (4.74) e integrando se obtiene:

$$D = \left(\frac{A^*}{x_0^a}\right)^{4/3} 5 + \frac{3(A^*)^{4/3}}{4(3-4a)} \left((x_{1.7})^{\frac{3-4a}{3}} - (x_0)^{\frac{3-4a}{3}} \right) \tag{4.77}$$

3.2. Para los dardos de fuego se utiliza la ecuación 4.72, que se sustituye en la 4.69, obteniéndose:

$$D = (A_{df} e^{-b_{df} x_0})^{4/3} 5 + \int_0^{t_{esc}} (A_{df} e^{-b_{df} x_0})^{4/3} dt \quad (4.78)$$

Para integrar la ecuación 4.78 debe tenerse en cuenta también las relaciones 4.75 y 4.76, quedando en la forma:

$$D = A_{df}^{4/3} e^{-\frac{4}{3} b_{df} x_0} 5 + \frac{3A_{df}^{4/3}}{16b_{df}} \left(e^{-\frac{4b_{df} x_0}{3}} - e^{-\frac{4b_{df} x_{1.7}}{3}} \right) \quad (4.79)$$

Las ecuaciones de dosis 4.77 (para incendios y bolas de fuego) y 4.79 (para dardos de fuego) permiten determinar la dosis recibida por cualquier afectado que se encuentre a una distancia inicial x_0 de los incendios citados, y siga las pautas de comportamiento (reacción y escape) mencionadas.

4.4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Gas Association; (1974). LNG Safety Research Program: Consequences of LNG Spills on Land. Phase II Project IS 3-1, Final Report.
- Atallah, S.; Shah, J.N.; (1990). *LNG Fire. A thermal radiation model for LNG fires*. Topical report GRI-89/0176, GRI.
- Bagster, D.F.; Pitblado, R.M.; (1989). *Thermal hazards in the process industry*. Chemical Engineering Progress, **7**, 69-75.
- Baumeister, T.; (1978). *Marks' standard handbook for mechanical engineers*. (Citado por Prugh, 1994).
- Bernstein, L.S.; Robertson, D.C.; Conant, J.A.; Sandford, B.P.; (1979). *Applied Optics*, **18**, 2454.
- Burguess, D.S.; Hertzberg, M.; (1974). *Radiation from pool flames*, en *Heat Transfer in Flames*. Cap. 27, p. 413. Afgan, N.H.; Beer, J.N.; (eds), John Wiley and Sons, New York.
- Center for Chemical Process and Safety (AIChE) and Technology, Inc.; (1989). *Guidelines for chemical process quantitative risk analysis*, pp 126, 142, 159, 161, 169.
- Chamberlain, G.A.; (1987). *Development in design methods for predicting thermal radiation from flares*. Chem. Eng. Res. Des., **65**, 299-309.
- Davis, B.C.; Bagster, D.F.; (1989). *The computation of view factors of fire models*. Journal of Loss Prevention in Process Industries, **2**, 224-234.
- Elder, T.; Strong, J.; (1953), Franklin Institute, **255**, 189.
- Fu, T.T.; (1971). *Heat radiation from fires of aviation fuels*. Fire Technology, **7** (1), 45-56.
- Gebhart, B.; (1971). *Heat Transfer, Second Edition*. McGraw-Hill, New York.
- Hagglund, B.; Persson, L.; (1976). *The heat radiation from petroleum fires*. FOA Rapport, Forsvarets Forskningsanstalt, Stockholm.

- Hamilton, D.C.; Morgan, W.R.; (1952). *Radiant-interchange configuration factors*. National Advisory Committee for Aeronautics, Technical note 2836, Washington.
- Hardee, H.C.; Lee, D.O. Benedick, W.B.; (1978). *Thermal hazard from LNG fireballs*. Comb. Sci. Tech. **17**(5), 189-197.
- Hottel, H.C.; Sarofim, A.F.; (1967). En *Radiative transfer*. McGraw-Hill, New York.
- Howard, J.N.; Garing, J.S.; (1962). *Infrared Physics*, **2**, 155.
- Howell, J.R.; (1982). *A catalog of radiation configuration factors*. McGraw-Hill Book Co., New York.
- Johnson, A.D.; (1992). *A model for predicting thermal radiation hazards from large scale LNG pool fires*. I. Chem. E. Symposium Series, **130**, Major hazards onshore and offshore, 507-524.
- Johnson, D.M.; Pritchard, M.J.; (1990). *Large scale experimental study of boiling liquid expanding vapour explosions (BLEVES)*. Gastech LNG/LPG Conference and Exhibition, Gastech.
- Kruse, P.W.; McGlauchlin, L.D.; McQuistan, R.B.; (1962). En *Elements of infrared technology: generation, transmission and detection*. John Wiley and Sons Inc. New York, USA.
- Kyle, T.G.; (1969). *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **9**, 1477.
- Mudan, K.S.; (1984). *Thermal radiation hazards from hydrocarbon pool fires*. Prog. Energy Combust. Sci., **10**, 59-80.
- Mudan, K.S.; (1987). *Geometric view factors for thermal radiation hazard assessment*. Fire Safety Journal, **12**, 89-96.
- NASA, (1979). *On the experiments with 7.5 m and 15 m JP-4 fuel pool fire measurements*. NASA Ames Research Center, Moffet Field, California.
- Navarro, J.; (2000). *Zonas de planificación para incendios en charco y bolas de fuego en instalaciones industriales*. Tesis doctoral, Universidad de Murcia, Murcia.
- Oinas, V.J.; (1981). *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **26**, 381.
- Perry, R.H.; (1992). *Manual del Ingeniero Químico 6ª edición*. McGraw-Hill, México.
- Prugh, W.; (1994). *Quantitative evaluation of Fireball hazards*. Process Safety Progress, **13**(2), 83-91.
- Raj, P.K.; (1977). *Calculation of thermal radiation hazards from LNG fires - A review of the state of art*. Paper 2, AGA Transmission Conference, St. Louis, Missouri, USA.
- Raj, P.K.; Kalelkar, A.S.; (1974). *Assessment models in support of the hazard assessment handbook*. (CG-446-3), Cap. 9, Technical report US Coast Guard, NTIS #AD776617.
- Rein, R.C.; Slipevich, C.M.; Welker, J.R.; (1970). *Radiation view factors for tilted cylinders*. J. Fire and Flammability, **1**, 140.
- Roberts, A.F.; (1982). *Thermal radiation hazards from release of LPG from pressurized storage*. J. Fire Safety Studies, **4**, 197-212.
- Sparrow, E.M.; Cess, R.D.; (1978). *Radiation heat transfer*. McGraw Hill Book Company, New York.
- Sparrow, E.M.; (1973). *Radiant interchange between surfaces separated by nonabsorbing and noemitting media*. En Handbook of Heat Transfer, W.M. Rohsenow, J.P. Hartnett (eds.), McGraw Hill Book Company, New York.

- Santamaria, J.M.; Braña, A.P.; (1994). *Análisis y reducción de riesgos en la Industria Química*. Fundación Mapfre, Madrid.
- Stannard, J.H.; (1977). *Fire Technol.*, **10**, 147-152.
- Thomas, P.H.; (1963). *The size of flames from natural gas*. 9th Symposium of Combustion, 844-859, Academic Press, Nueva York.
- Thomas, P.H.; (1965). F.R. Note 600, Fire Research Station, Borehamwood, England.
- TNO; (1985). *Analysis of the LPG incident in San Juan de Ixhuatepec, Mexico City, 19-11-84*. Pietersen, C.M.; Huerta, S.C., TNO Report B4-0222, TNO, Directorate General of Labour, 2273 KH Vooburg, The Netherlands.
- TNO; (1997). *Methods for the calculation of physical effects (The yellow book), Chapter 6 Heat flux from fires*. C.J.H. van den Bosch y R.A.P.M. Weterings, eds. The Hague (Holland).
- Welker, J.R.; Sliepcevich, C.M.; (1966). *Bending of wind blown flames pools*. *Fire Technol.*, **2**, 127.

Capítulo 5

Valores límite para establecer las zonas de planificación en los accidentes de tipo térmico

El establecimiento de las zonas de planificación ante la génesis de incendios exteriores debe seguir las pautas siguientes:

1. Seleccionar los elementos vulnerables afectados: en este estudio sólo se hace referencia a los **seres humanos**.
2. Determinar la magnitud que provoca el daño, que, como se ha expuesto en el capítulo 3, está definida por la dosis de radiación térmica.
3. Asignar los valores límite de las dosis que provocan los niveles de daño a considerar. En la Directriz Básica (2003), se establecen dos zonas de planificación: intervención y alerta; la primera se define como *“aquella en la que las consecuencias de los accidentes producen un nivel de daños que justifica la aplicación inmediata de medidas de protección”*. Y la de alerta *“es aquella en la que las consecuencias de los accidentes provocan efectos que, aunque perceptibles por la población, no justifiquen la intervención, excepto para los grupos críticos de población”*.

Atendiendo a la definición de la zona de alerta, es evidente que en ella no deben producirse niveles de daño relevantes, por lo que se ha considerado razonable aceptar como máximo la génesis de quemaduras de primer grado, cuyo límite inferior queda establecido por la isolínea de dosis de $115 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3}\text{s}$.

Respecto a la zona de intervención, se establece su límite inferior coincidente con la isolínea de dosis que puede provocar quemaduras de segundo grado, cuyo valor es $250 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3}\text{s}$; el daño provocado necesita la aplicación de medidas de protección (ver capítulo 3), lo que está de acuerdo con la definición de dicha zona.

Con respecto a los valores de las dosis que delimitan las zonas de planificación, se observa que los mismos se alcanzan para tiempos de exposición muy pequeños, tal y como se indica en la tabla 5.1, donde se incluyen los correspondientes a las intensidades térmicas de 3, 5 y 7 kW/m^2 . Esta situación obliga a plantear las hipótesis y el modelo de *“comporta-*

miento de la población frente a los incendios”, descritos en el apartado 4.3.1, sobre todo en los de media o larga duración.

TABLA 5.1. Tiempos de exposición para alcanzar las dosis de radiación correspondientes a las zonas de intervención $[250 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3}\text{s}]$ y de alerta $[115 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3}\text{s}]$ para diversas intensidades

Intensidad, kW/m ²	Tiempo de exposición, s.	
	Zona de Intervención	Zona de Alerta
3	60	30
5	30	15
7	20	10

La argumentación expuesta en éste y en los anteriores capítulos permite justificar la definición de las variables que condicionan los fenómenos de tipo térmico y los valores umbral que delimitan las zonas de planificación recogidas en la Directriz Básica (2003), que se transcriben a continuación:

“Variables para los fenómenos de tipo térmico:

Dosis de radiación, D, recibida por los seres humanos procedentes de llamas o cuerpos incandescentes en incendios y explosiones expresada mediante:

$$D = I_m^{4/3} \cdot t_{exp}$$

donde I_m es la intensidad media recibida, en kW/m², y t_{exp} el tiempo de exposición, en segundos. Esta expresión es válida para intensidades superiores a 1.7 kW/m²; para valores inferiores al anterior, el tiempo de exposición es prácticamente irrelevante, esto es, se considera que en dichas condiciones, la mayoría de la población puede estar expuesta durante dilatados periodos de tiempo sin sufrir daño.

Con fines de planificación, en los incendios de corta duración, inferiores a 1 minuto, el tiempo de exposición se hace coincidir con la duración de estos; para los de mayor duración, se establece como tiempo de exposición el transcurrido hasta que los afectados alcancen una zona protegida frente a la radiación o donde la intensidad térmica sea inferior a los 1.7 kW/m².

Para este último caso y con objeto de determinar las isolíneas de intensidad térmica que delimitan las zonas de intervención y alerta, se recomienda seguir el modelo de respuesta de la población ante la génesis de incendios, propuesto por TNO, donde se establece un primer periodo de reacción de unos 5

segundos, donde la población permanece estática y a continuación se produce la huida, alejándose del incendio a una velocidad media de 4 m/s.

Valores umbrales para la zona de intervención.

Los valores umbrales que deberán adoptarse para la delimitación de la Zona de Intervención son los que a continuación se señalan:

...

4. Una dosis de radiación térmica de $250 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3}\text{s}$, equivalente a las combinaciones de intensidad térmica y tiempo de exposición que se indican a continuación:

$I, \text{ kW/m}^2$	7	6	5	4	3
$t_{exp}, \text{ s}$	20	25	30	40	60

Valores umbrales para la zona de alerta.

Para delimitación de la Zona de Alerta se considerarán los siguientes valores umbrales o circunstancias:

...

4. Una dosis de radiación térmica de $115 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3}\text{s}$, equivalente a las combinaciones de intensidad térmica y tiempo de exposición que se indican a continuación:

$I, \text{ kW/m}^2$	6	5	4	3	2
$t_{exp}, \text{ s}$	11	15	20	30	45

En el capítulo siguiente se indican algunos ejemplos donde se expone la secuencia, criterios y metodologías para establecer las zonas de planificación.

5.1. Referencias

Directriz Básica de Protección Civil para el Control y Planificación sobre el Riesgo de Accidentes Graves en los que intervienen Sustancias Peligrosas. En prensa.

Capítulo 6

Ejemplos de cálculo de zonas de planificación

6.1. EL PROGRAMA EFFECTS 4

Entre los diferentes programas informáticos disponibles para la evaluación de las consecuencias derivadas de los accidentes graves provocados por sustancias peligrosas, y más concretamente los que determinan las magnitudes características de los incendios, se ha seleccionado el programa EFFECTS-4, desarrollado por *TNO*, que resuelve los principales tipos de incendios que pueden manifestarse en la industria química de proceso o almacenamiento, disponiendo de una extensa base de datos de sustancias.

Las opciones de cálculo disponibles se indican en la figura 6.1.

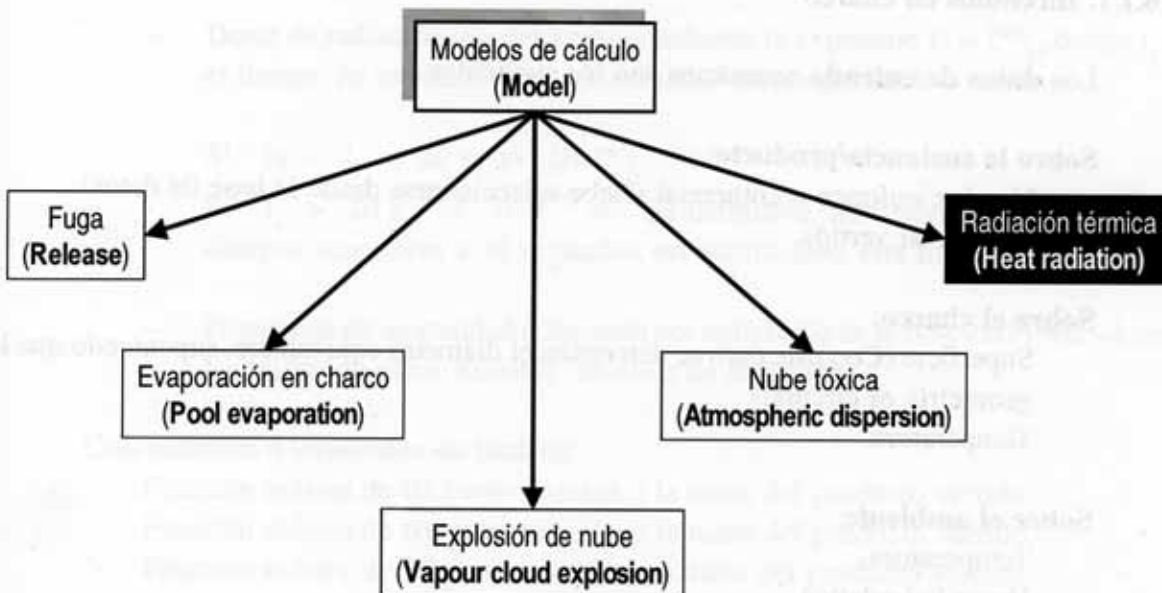


FIGURA 6.1. Módulos de cálculo de EFFECTS-4.

La opción radiación térmica permite acceder a los módulos de cálculo indicados en la figura 6.2.

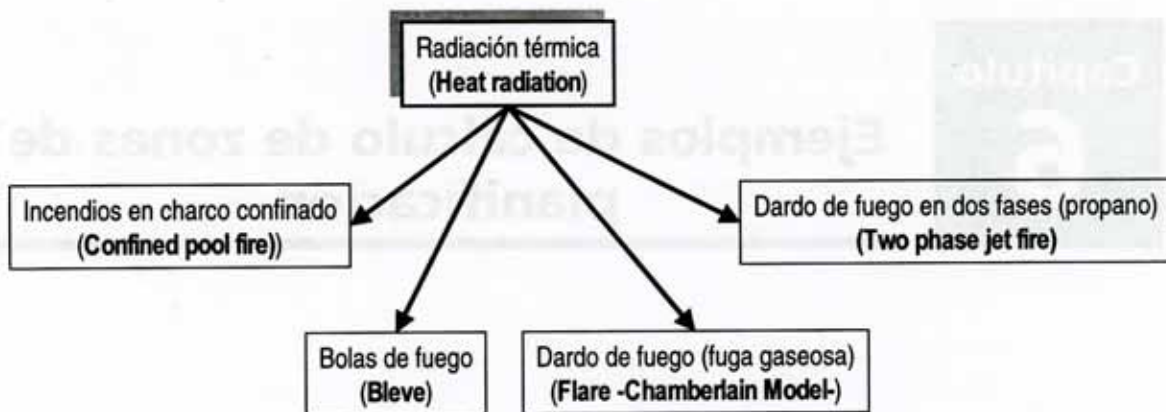


FIGURA 6.2. Incendios simulados por EFFECTS-4.

La opción “dardo de fuego en dos fases” se ha desarrollado sólo para el propano, no siendo aplicable a otro producto, por ello no se ha estimado de interés su inclusión aquí.

En todos los casos el programa utiliza el modelo de llama sólida, comentado en el Capítulo 4.

6.1.1. Incendios en charco

Los **datos de entrada** necesarios son los siguientes:

Sobre la sustancia/producto:

- Nombre químico o comercial (Debe seleccionarse desde la base de datos).
- Masa total vertida.

Sobre el charco:

- Superficie (Con este dato se determina el diámetro equivalente, suponiendo que la geometría es circular).
- Temperatura.

Sobre el ambiente:

- Temperatura.
- Humedad relativa.
- Fracción de CO_2 .
- Velocidad del viento a 10 m de altura.

Sobre la llama:

- Fracción de energía emitida en forma de radiación.

Sobre el receptor:

- Distancia al centro del incendio.
- Duración de la exposición a la radiación.

Los **resultados** proporcionados son los siguientes:

Con relación al incendio:

- Caudal másico de producto vaporizado incorporado al incendio.
- Inclinación de la llama (Debida a la velocidad del aire).
- Temperatura de la llama.
- Energía emitida en forma de radiación desde la superficie de la llama.
- Duración.

Con relación al ambiente:

- Transmisividad atmosférica a la radiación térmica.

Con relación al receptor:

- Factor de visión máximo.
- Intensidad térmica recibida a las distancias solicitadas.
- Además, de forma gráfica se proporcionan los parámetros siguientes, en función de la distancia al centro del charco:

- Intensidad de radiación.
- Dosis de radiación (Se determina mediante la expresión $D = I^{4/3} t_e$, donde t_e es el tiempo de exposición, con las limitaciones siguientes:

$$\text{Si } 1s < t_e < 20s \quad \text{sv } D = I^{4/3} t_e$$

Si $t_e > 20s$ sv $D = I^{4/3} 20$. En definitiva, no determina las dosis para tiempos superiores a 20 segundos, no justificando esta limitación).

- Porcentaje de mortalidad (Obtenido por aplicación de la función Probit –Anexo I– utilizando como variable las dosis de radiación).

Con relación a emisiones de tóxicos:

- Fracción másica de HCl con relación a la masa del producto vertido.
- Fracción másica de NO₂ con relación a la masa del producto vertido.
- Fracción másica de SO₂ con relación a la masa del producto vertido.

6.1.2. Bolas de fuego

Los **datos de entrada** necesarios son los siguientes:

Sobre la sustancia/producto:

Nombre químico o comercial (Debe seleccionarse desde la base de datos).
Masa total.

Sobre el contenedor:

Temperatura.
Presión en el momento de la rotura (Utilizada para determinar la fracción de energía radiante, mediante la ecuación 4.64). Si se trata de una sustancia pura debe coincidir con su presión de vapor a la temperatura indicada.

Sobre el ambiente:

Temperatura.
Humedad relativa.
Fracción de CO_2 .

Sobre el receptor:

Orientación respecto de la bola de fuego (Ángulo formado por la perpendicular al plano del receptor y la recta que une el receptor con el centro de la bola de fuego. En general se considera 0° , obteniéndose así el factor de visión máximo).
Distancia desde el centro del contenedor. (Debe ser superior al radio de la bola de fuego).

Los **resultados** proporcionados son los siguientes:

Con relación a la bola de fuego:

Radio.
Duración.
Altura desde el suelo a la base de la bola.
Temperatura de la superficie (Se establece como la suma de 1700 K y la temperatura ambiente, en K).
Energía emitida en forma de radiación desde la superficie de la bola.

Con relación al ambiente:

Transmisividad atmosférica a la radiación térmica.

Con relación al receptor:

Factor de visión máximo.
Intensidad térmica recibida a las distancias solicitadas.
En forma gráfica, se proporcionan los parámetros que se citan en función de la distancia al centro de la bola de fuego:
– Intensidad de radiación.
– Dosis de radiación (Con las mismas limitaciones indicadas para los incendios en charco).

- Porcentaje de mortalidad (Igual que para los incendios en charco).

6.1.3. Dardos de fuego

Los **datos de entrada** necesarios son los siguientes:

Sobre la sustancia/producto:

- Nombre químico o comercial (Debe seleccionarse desde la base de datos).
- Caudal másico emitido.

Sobre el contenedor:

- Presión interior inicial.
- Temperatura interior inicial.
- Altura sobre el suelo del orificio de fuga.
- Dirección de salida del orificio (Ángulo formado por la perpendicular al orificio y la vertical).

Sobre el ambiente:

- Velocidad del viento a 10 m de altura.
- Temperatura.
- Humedad relativa.
- Fracción de CO_2 .

Sobre el receptor:

- Distancia desde la fuga.
- Duración de la exposición a la radiación.

Los **resultados** proporcionados son los siguientes:

Con relación al dardo de fuego (Considerado como un tronco de cono):

- Ángulo formado por el eje del orificio y el de la llama.
- Distancia de despeje (Desde el orificio de salida a la base inferior de la llama).
- Diámetro de la base inferior del dardo de fuego.
- Diámetro de la base superior del dardo de fuego.
- Longitud de la llama (Altura del tronco de cono).
- Ángulo de inclinación de la llama.
- Energía emitida en forma de radiación desde la superficie de la llama

Con relación al ambiente:

- Transmisividad atmosférica a la radiación térmica.

Con relación al receptor:

- Factor de visión máximo.

Intensidad térmica recibida a la distancia solicitada.

Distancia de seguridad (Para $I = 1 \text{ kW/m}^2$).

En forma gráfica, se proporcionan los parámetros que se citan en función de la distancia al centro de la bola de fuego:

- Intensidad de radiación.
- Porcentaje de mortalidad (Igual que para los incendios en charco).

6.2. EJEMPLOS DE CÁLCULO PARA INCENDIOS EN CHARCO

6.2.1. Descripción de los escenarios accidentales

Se evalúan dos incendios en charco con las características siguientes:

⇨ Producto: Gasolina.

⇨ Escenario 1CH.- Diámetro: 20 m (Superficie: 314 m^2)
Cantidad vertida: 250 Tm.

⇨ Escenario 2CH.- Diámetro: 100 m (Superficie: 7854 m^2)
Cantidad vertida: 25000 Tm.

6.2.2. Datos de entrada al programa EFFECTS 4

Además de los datos anteriores, el programa solicita los que se indican a continuación, habiéndose incluido los valores numéricos asignados.

Temperatura del charco: $15 \text{ }^\circ\text{C}$.

Fracción de energía emitida en forma de radiación: Se ha considerado $\eta = 0.1$, próximo al menor valor indicado en la tabla 4.3.

Velocidad del viento a 10 m de altura: 2 m/s.

Temperatura ambiente: 15°C

Humedad ambiental: 70%

Fracción de CO_2 en la atmósfera: 0.03%

Distancias desde el centro del recipiente: Para delimitar las zonas de planificación se introducen distancias cuyas intensidades estén comprendidas entre 10 y 1.7 kW/m^2 , por lo que deben efectuarse los tanteos previos pertinentes. Las distancias seleccionadas se indican en las tablas 6.1 y 6.2.

Duración de la exposición (Este dato lo solicita EFFECTS 4 para calcular la dosis, que se comenta posteriormente): 20 s.

6.2.3. Resultados proporcionados por el programa EFFECTS 4

En las tablas 6.1 y 6.2 se indican los resultados obtenidos para los dos casos evaluados.

TABLA 6.1. Intensidad térmica en función de la distancia al centro del incendio para el escenario 1CH (charco de gasolina de 20 m de diámetro)
Duración del incendio: 4.02 horas

x, m	I, kW/m ²
20	10.1
22	8.9
25	7.3
27	6.4
30	5.2
32	4.5
35	3.7
37	3.2
40	2.7
43	2.2
47	1.7

TABLA 6.2. Intensidad térmica en función de la distancia al centro del incendio para el escenario 2CH (charco de gasolina de 100 m de diámetro)
Duración del incendio: 16.07 horas

x, m	I, kW/m ²
87	10.0
96	8.2
105	6.7
114	5.5
123	4.5
132	3.7
141	3.1
150	2.6
159	2.2
168	1.9
177	1.7

EFFECTS 4 representa la dosis de radiación térmica frente a la distancia al centro del incendio, pero con los criterios indicados en el apartado anterior.

6.2.4. Tratamiento de los resultados

Los valores distancia-intensidad de las tablas 6.1 y 6.2 se representan en escala doble logarítmica –figuras 6.3 y 6.4– obteniéndose relaciones prácticamente lineales, cuyas ecuaciones se ajustan por mínimos cuadrados, resultando:

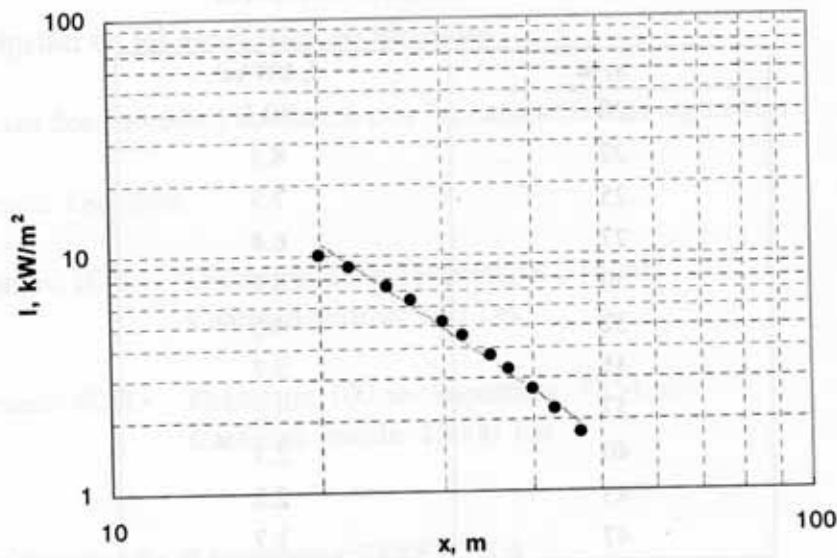


FIGURA 6.3. Representación de la intensidad térmica frente a la distancia al centro del incendio y recta de ajuste para el escenario 1CH (charco de gasolina de 20 m de diámetro.)

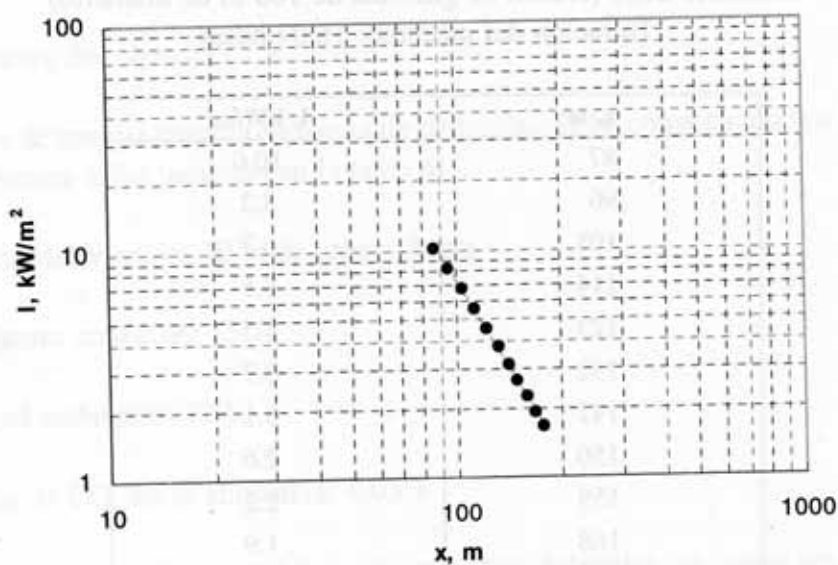


FIGURA 6.4. Representación de la intensidad térmica frente a la distancia al centro del incendio y recta de ajuste para el escenario 2CH (charco de gasolina de 100 m de diámetro.)

$$\text{Para } D_{ch} = 20 \text{ m:} \quad I = \frac{5.47 \cdot 10^3}{x^{2.07}} \quad r^2: 0.987 \quad (6.1)$$

$$\text{Para } D_{ch} = 100 \text{ m:} \quad I = \frac{1.02 \cdot 10^6}{x^{2.57}} \quad r^2: 0.998 \quad (6.2)$$

Los parámetros de las ecuaciones 6.1 y 6.2 se introducen en la ecuación 4.77:

$$D = \left(\frac{A^*}{x_0^a} \right)^{\frac{4}{3}} 5 + \frac{3(A^*)^{\frac{4}{3}}}{4(3-4a)} \left((x_{1.7})^{\frac{3-4a}{3}} - (x_0)^{\frac{3-4a}{3}} \right) \quad (4.77)$$

obteniéndose las siguientes funciones de dosis:

$$\text{Para } D_{ch} = 20 \text{ m:} \quad D = -15.6 + 4.82 \cdot 10^5 x_0^{-2.76} + 1.37 \cdot 10^4 x_0^{-1.76} \quad (6.3)$$

$$\text{Para } D_{ch} = 100 \text{ m:} \quad D = -37.1 + 5.13 \cdot 10^8 x_0^{-3.43} + 1.06 \cdot 10^7 x_0^{-2.43} \quad (6.4)$$

6.2.5. Zonas de planificación

Como se indica en el capítulo 5, las zonas de intervención y alerta están limitadas inferiormente por las isolíneas de dosis de 250 y 115 (kW/m²)^{4/3}s, respectivamente. Estos valores se sustituyen en 6.3 y 6.4, obteniendo expresiones que contienen el valor de x_0 como único parámetro. Mediante operaciones de tanteo o a través de un sencillo programa se determinan los valores de x_0 que verifican las ecuaciones anteriores, indicándose en las tablas 6.3 y 6.4, donde se incluyen también las intensidades térmicas que corresponden a los límites de las zonas de intervención y alerta, así como los tiempos totales de exposición (suma de los correspondientes a la "reacción", y "escape", éste último obtenido mediante la ecuación 4.75).

TABLA 6.3. Zonas de planificación y otros datos relevantes para el escenario 1CH (incendio de gasolina de 20 m de diámetro)

Zonas de planificación	Distancia desde el centro del incendio, m	Intensidad térmica, kW/m ²	Tiempo de exposición, s	Tiempo de duración del incendio, horas
Intervención	17	12.2	12.5	4
Alerta	23	8.3	11.0	

TABLA 6.4. Zonas de planificación y otros datos relevantes para el escenario 2CH (incendio de gasolina de 100 m de diámetro)

Zonas de planificación	Distancia desde el centro del incendio, m	Intensidad térmica, kW/m ²	Tiempo de exposición, s	Tiempo de duración del incendio, horas
Intervención	91	9.2	26.5	16
Alerta	114	5.5	20.7	

A primera vista, las intensidades térmicas que delimitan las zonas de planificación pueden parecer muy altas, pero debe tenerse en cuenta que se trata de valores en las posiciones iniciales, a partir de las cuales los individuos huyen con rapidez (4 m/s) hasta alcanzar la zona de seguridad.

6.3. EJEMPLOS DE CÁLCULO PARA BOLAS DE FUEGO

6.3.1. Descripción de los escenarios accidentales

Se evalúan dos bolas de fuego con las características siguientes:

- ◇ Producto: Butano.
- ◇ Escenario 1BF.- Masa: 20000 kg.
Cantidad típica transportada en cisternas.
- ◇ Escenario 2BF.- Masa: 3000 Tm.
Cantidad típica almacenada en una esfera.

6.3.2. Datos de entrada al programa EFFECTS 4

Además de los datos anteriores, el programa solicita los que se indican a continuación, habiéndose incluido los valores numéricos asignados.

Temperatura en el contenedor: 50 °C (Supuesta como consecuencia de un incendio exterior).

Presión de rotura del recipiente: 5.1 bar (que corresponde a la presión de vapor del butano a 50°. Este dato sirve para determinar la fracción de energía radiante, mediante la ecuación 4.64).

Orientación del receptor respecto a la bola de fuego: 0°.

Temperatura ambiente: 15°C

Humedad relativa: 70%

Fracción de CO₂ en la atmósfera: 0.03%

Distancias desde el centro del recipiente: Para delimitar las zonas de planificación se introducen distancias cuyas intensidades están comprendidas entre 10 y 1.7 kW/m², por lo que deben efectuarse los tanteos previos pertinentes. Las distancias se indican en las tablas 6.5 y 6.6.

6.3.3. Resultados proporcionados por el programa EFFECTS 4

En las tablas 6.5 y 6.6 se indican los resultados obtenidos para los dos casos evaluados.

TABLA 6.5. Intensidad térmica en función de la distancia al centro del equipo afectado y otros datos relevantes para el escenario 1BF (20 Tm de butano)

Duración de la bola de fuego: 11.2 s

Diámetro de la bola: 162 m

Altura hasta la base: 81 m

x, m	I, kW/m ²
250	11.6
275	10.2
300	8.9
325	7.8
400	5.4
450	4.3
500	3.5
550	2.9
600	2.4
650	2.0
705	1.7

TABLA 6.6. Intensidad térmica en función de la distancia al centro del equipo afectado y otros datos relevantes para el escenario 2BF (3000 Tm de butano)

Duración de la bola de fuego: 41.2 s

Diámetro de la bola: 824 m

Altura hasta la base: 412 m

x, m	I, kW/m ²
2200	6.5
2400	5.4
2600	4.6
2800	4.0
3000	3.4
3200	3.0
3400	2.6
3600	2.3
3800	2.1
4000	1.9
4200	1.7

EFFECTS 4 representa la dosis de radiación térmica frente a la distancia al centro del equipo afectado, pero con los criterios siguientes:

1. Considera al individuo estático, por lo que la expresión de la dosis corresponde a la ecuación 3.1:

$$D = I^{4/3} t_e \quad (3.1)$$

2. El tiempo de exposición, t_e , se hace coincidir con la duración de la bola de fuego, t_d , con las limitaciones indicadas en el apartado 6.1.1.

6.3.4. Tratamiento de los resultados

Los valores distancia-intensidad de las tablas 6.5 y 6.6 se representan en escala doble logarítmica. –figuras 6.5 y 6.6– obteniéndose relaciones prácticamente lineales, cuyas ecuaciones se ajustan por mínimos cuadrados, resultando:

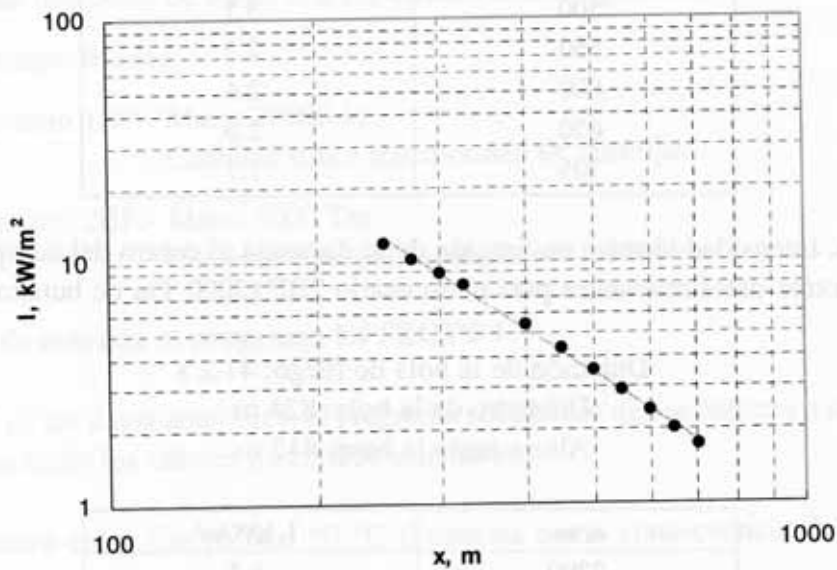


FIGURA 6.5. Representación de la intensidad térmica frente a la distancia al centro de la bola de fuego y recta de ajuste para el escenario IBF (20 Tm de butano).

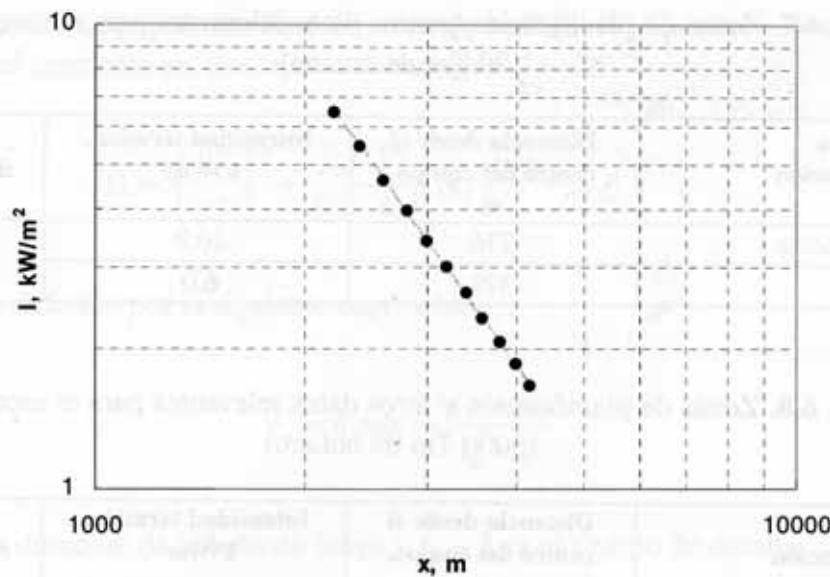


FIGURA 6.6. Representación de la intensidad térmica frente a la distancia al centro de la bola de fuego y recta de ajuste para el escenario 2BF (3000 Tm de butano).

Para 1BF (20 Tm butano):
$$I = \frac{3.56 \cdot 10^5}{x^{1.86}} \quad r^2: 0.997 \quad (6.5)$$

Para 1BF (3000 Tm butano):
$$I = \frac{7.19 \cdot 10^7}{x^{2.11}} \quad r^2: 0.999 \quad (6.6)$$

Las ecuaciones 6.5 y 6.6 se sustituyen en la ecuación 3.1:

Para 1BF (20 Tm de butano):
$$D = \left(\frac{3.56 \cdot 10^5}{x^{1.86}} \right)^{4/3} 11.2 \quad (6.7)$$

Para 2BF (3000 Tm de butano):
$$D = \left(\frac{7.19 \cdot 10^7}{x^{2.11}} \right)^{4/3} 41.2 \quad (6.8)$$

6.3.5. Zonas de planificación

Como se indica en el capítulo 5, las zonas de intervención y alerta están limitadas inferiormente por las isólinas de dosis de 250 y 115 (kW/m^2) $^{4/3}$ s, respectivamente. Estos valores se sustituyen en 6.7 y 6.8, obteniendo ecuaciones que contienen el valor de x_0 como único parámetro, que puede determinarse fácilmente. En las tablas 6.7 y 6.8 se incluyen los datos de interés para los escenarios evaluados.

TABLA 6.7. Zonas de planificación y otros datos relevantes para el escenario 1BF (20 Tm de butano)

Zonas de planificación	Distancia desde el centro del equipo, m	Intensidad térmica, kW/m ²	Tiempo de duración de la bola, s
Intervención	276	10.2	11.2
Alerta	378	6.0	

TABLA 6.8. Zonas de planificación y otros datos relevantes para el escenario 2BF (3000 Tm de butano).

Zonas de planificación	Distancia desde el centro del equipo, m	Intensidad térmica, kW/m ²	Tiempo de duración de la bola, s
Intervención	2790	4.0	41.2
Alerta	3690	2.2	

De los diferentes tipos de incendios, las bolas de fuego son las que provocan las zonas de planificación más amplias debido a los grandes tamaños que pueden alcanzar dichas bolas y a la gran potencia desarrollada.

6.3.6. Validación del procedimiento simplificado para determinar la dosis de radiación térmica para bolas de fuego

Como se ha expuesto anteriormente, el procedimiento utilizado para determinar las dosis de radiación térmica para las bolas de fuego, supone que los afectados permanecen estáticos durante todo el período de duración del incendio (ecuación 3.1), lo que constituye una simplificación respecto al modelo de "comportamiento de la población frente a los incendios", representado analíticamente por la ecuación 4.77, considerado más realista y riguroso. Por ello, conviene comparar los resultados de ambos procedimientos para justificar y validar la metodología simplificada aquí propuesta.

Como es sabido, la ecuación 4.77 considera que el individuo escapa y alcanza una posición ($x_{1,7}$) donde la intensidad térmica es 1.7 kW/m² (zona de seguridad), aspecto que, inevitablemente, debe plantearse así para determinar las dosis en los incendios de larga duración (salvo que encuentre antes zonas protegidas –apantalladas– frente a la radiación); pero en el caso de las bolas de fuego, los tiempos de duración de éstas son pequeños, de manera que los individuos, dependiendo de las posiciones de partida (x_0), pueden recibir valores de dosis que incluyen los que delimitan las zonas de planificación, sin necesidad de alcanzar la zona de seguridad antes citada. Así pues, se utiliza la ecuación 4.77 pero susti-

tuyendo la distancia $x_{1,7}$ por otra final (x_f) correspondiente a la posición alcanzada por el individuo en el momento en que la bola se extingue ($I = 0$):

$$D = 5 \left(\frac{A^*}{x_0^a} \right)^{\frac{4}{3}} + \frac{3(A^*)^{\frac{4}{3}}}{4(3-4a)} \left((x_f)^{\frac{3-4a}{3}} - (x_0)^{\frac{3-4a}{3}} \right) \quad (6.9)$$

donde x_f está definido por la siguiente expresión:

$$v_e = 4 \text{ m/s} = \frac{x_f - x_0}{t_{bf} - 5} \quad (6.10)$$

donde t_{bf} es la duración de la bola de fuego y $t_{bf} - 5$ es el tiempo de escape.

Sustituyendo la ecuación 6.10 en 6.9 se tiene:

$$D = \left(\frac{A^*}{x_0^a} \right)^{\frac{4}{3}} 5 + \frac{3(A^*)^{\frac{4}{3}}}{4(3-4a)} \left((x_0 + 4(t_{bf} - 5))^{\frac{3-4a}{3}} - (x_0)^{\frac{3-4a}{3}} \right) \quad (6.11)$$

La ecuación 6.11 relaciona la dosis con la distancia inicial al incendio, x_0 , de manera que al asignar los valores de dosis deseados se pueden determinar las respectivas distancias (x_0) y, mediante las ecuaciones 6.5 y 6.6, las isóneas de intensidad asociadas.

Para evaluar los escenarios 1BF y 2BF, mediante el modelo de "comportamiento de la población frente a los incendios", denominado en adelante "método general", se procede como sigue:

1. A partir de la ecuación 6.11 y teniendo en cuenta las ecuaciones 6.5 y 6.6, que relacionan las intensidades térmicas y las distancias al origen del accidente, se obtiene:

Para el escenario 1BF:

$$D = -612 + 1.26 \cdot 10^8 x_0^{-2.48} + 4.26 \cdot 10^6 x_0^{-1.48} \quad (6.12)$$

Para el escenario 2BF:

$$D = -943 + 1.49 \cdot 10^{11} x_0^{-2.81} + 4.12 \cdot 10^9 x_0^{-1.81} \quad (6.13)$$

2. En cada una de las expresiones anteriores se sustituyen los valores de dosis que delimitan las zonas de intervención ($250 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3}\text{s}$) y alerta ($115 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3}\text{s}$). Por tanteos sucesivos se determinan las distancias que delimitan las zonas citadas para

cada escenario que se indican en las tablas 6.9 y 6.10, donde se incluyen también las obtenidas con el método simplificado.

TABLA 6.9. Zonas de planificación obtenidas con las metodologías simplificada y general para el escenario 1BF (20 Tm de butano)

Zonas de planificación	Método simplificado		Método general		Desviación, %	
	x_p , m	I_p , kW/m ²	x_p^* , m	I_p^* , kW/m ²	$100(x_p - x_p^*)/x_p^*$	$100(I_p - I_p^*)/I_p^*$
Intervención	270	10.4	276	10.2	-2.2	2.0
Alerta	370	6.2	378	6.0	-2.1	3.3

TABLA 6.10. Zonas de planificación obtenidas con las metodologías simplificada y general para el escenario 2BF (3000 Tm de butano)

Zonas de planificación	Método simplificado		Método general		Desviación, %	
	x_p , m	I_p , kW/m ²	x_p^* , m	I_p^* , kW/m ²	$100(x_p - x_p^*)/x_p^*$	$100(I_p - I_p^*)/I_p^*$
Intervención	2735	4.2	2790	4.0	-1.9	5.0
Alerta	3610	2.3	3690	2.2	-2.1	4.5

Las últimas columnas de las tablas 6.9 y 6.10 informan sobre la desviación de los procedimientos, observándose la práctica coincidencia de los resultados, quedando así justificado y validado el procedimiento simplificado propuesto para determinar las zonas de planificación en las bolas de fuego.

Conviene indicar que las intensidades que delimitan las zonas de planificación tiene valores diferentes que dependen de las características de los incendios.

6.4. EJEMPLOS DE CÁLCULO PARA DARDOS DE FUEGO

6.4.1 Descripción de los escenarios accidentales

Se evalúan dos dardos con las características siguientes:

- ◇ Producto: Gas natural.
- ◇ Escenario 1DF.-Caudal fugado: 10 kg/s.
- ◇ Escenario 2DF.-Caudal fugado: 30 kg/s.

6.4.2. Datos de entrada al programa EFFECTS 4

Además de los datos anteriores, el programa necesita los que se indican a continuación:

Altura de la fuga sobre el nivel del suelo: 2 m.

Presión inicial de la fuga: 5 bar.

Temperatura inicial de la fuga: 15 °C.

Dirección del chorro: 0°

Velocidad del viento a 10 m de altura: 2 m/s.

Temperatura ambiente: 15°C

Humedad ambiental: 70%

Fracción de CO₂ en la atmósfera: 0.03%

Distancias desde el centro del orificio de fuga: Interesa conocer la distancia a la que se produce la intensidad de 1.7 kW/m², por lo que deben efectuarse los tanteos previos pertinentes. Las distancias seleccionadas se indican en las tablas 6.11 y 6.12.

6.4.3. Resultados proporcionados por el programa EFFECTS 4

En las tablas 6.11 y 6.12 se indican los resultados obtenidos para los dos casos evaluados.

TABLA 6.11. Intensidades térmicas en función de la distancia al origen del dardo de fuego y otros datos relevantes para el escenario 1DF (caudal fugado 10 kg/s)

x, m	I, kW/m ²
1	6.9
5	6.6
10	6.0
15	5.2
20	4.4
25	3.7
30	3.1
35	2.6
40	2.1
45	1.8
47	1.7

Longitud de despegue:	5.3 m
Longitud de la llama:	23.8 m
Diámetro inferior de la llama:	1.7 m
Diámetro superior de la llama:	7.8 m

TABLA 6.12. Intensidades térmicas en función de la distancia al origen del dardo de fuego y otros datos relevantes para el escenario 2DF (caudal fugado 30 kg/s)

x, m	I, kW/m ²
5	6.9
10	6.6
20	5.8
25	5.3
30	4.8
40	3.9
50	3.1
60	2.5
65	2.3
70	2.0
80	1.7

Longitud de despegue: 8.6 m
 Longitud de la llama: 42.8 m
 Diámetro inferior de la llama: 3 m
 Diámetro superior de la llama: 12.5 m

Para este incendio, EFFECTS 4 no representa la dosis de radiación térmica frente a la distancia al origen.

6.4.4. Tratamiento de los resultados

Los valores distancia-intensidad de las tablas 6.11 y 6.12 se representan en escala semilogarítmica –figuras 6.7 y 6.8– obteniéndose relaciones prácticamente lineales, por lo que se ajustan a funciones exponenciales, resultando:

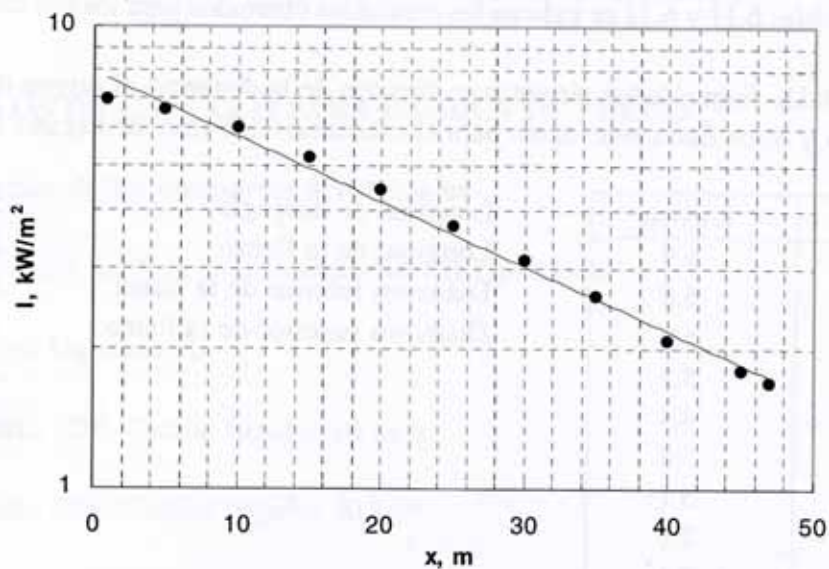


FIGURA 6.7. Representación de la intensidad térmica frente a la distancia al origen del dardo de fuego y recta de ajuste para el escenario 1DF (caudal fugado 10 kg/s).

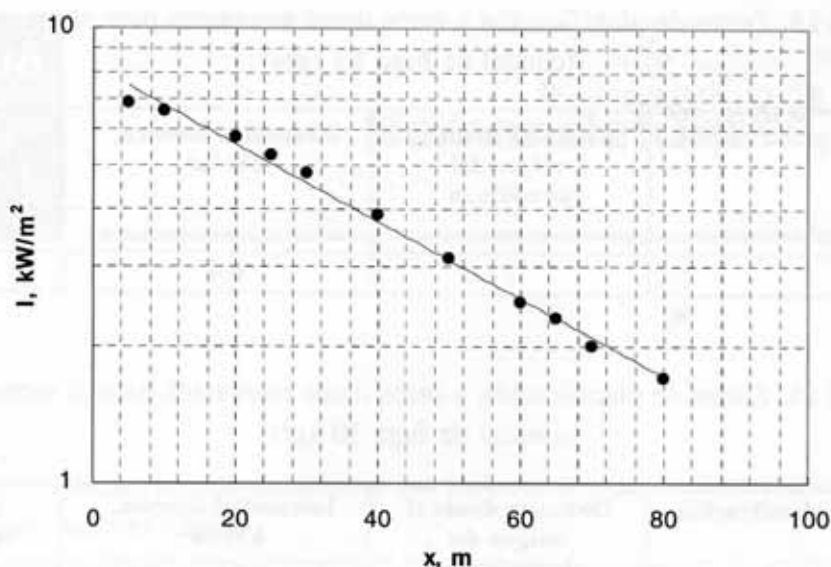


FIGURA 6.8. Representación de la intensidad térmica frente a la distancia al origen del dardo de fuego y recta de ajuste para el escenario 2DF (caudal fugado 30 kg/s).

$$\text{Para 1DF (10 kg/s):} \quad I = 7.95e^{-0.032x} \quad r^2: 0.990 \quad (6.14)$$

$$\text{Para 2DF (30 kg/s):} \quad I = 8.27e^{-0.020x} \quad r^2: 0.993 \quad (6.15)$$

Los parámetros de las ecuaciones 6.14 y 6.15 se introducen en la ecuación 4.79:

$$D = A_{df}^{4/3} e^{-\frac{4}{3}b_{df}x_0} 5 + \frac{3A_{df}^{4/3}}{16b_{df}} \left(e^{-\frac{4b_{df}x_0}{3}} - e^{-\frac{4b_{df}x_{1,7}}{3}} \right) \quad (4.79)$$

obteniéndose las siguientes funciones:

$$\text{Para 1DF (10 kg/s):} \quad D = 171.4e^{-0.043x_0} - 92.1e^{-0.043x_{1,7}} \quad (6.16)$$

$$\text{Para 2DF (30 kg/s):} \quad D = 242.7e^{-0.026x_0} - 159.1e^{-0.026x_{1,7}} \quad (6.17)$$

6.4.5. Zonas de planificación

Como se indica en el capítulo 5, las zonas de intervención y alerta están limitadas inferiormente por las isolíneas de dosis de 250 y 115 (kW/m²)^{4/3}s, respectivamente. Estos valores se sustituyen en 6.16 y 6.17, obteniendo ecuaciones que contienen el valor de x_0 como único parámetro. Mediante operaciones de tanteo o a través de un sencillo programa se determinan los valores de x_0 que verifican las ecuaciones anteriores, indicándose en las tablas 6.13 y 6.14, donde se incluyen también las intensidades térmicas que corresponden a los límites de las zonas de planificación, así como los tiempos totales de exposición (suma de los correspondientes a la “reacción”, y “escape”) obtenidos mediante la ecuación 4.75.

TABLA 6.13. Zonas de planificación y otros datos relevantes para el escenario 1DF (caudal de fuga 10 kg/s)

Zonas de planificación	Distancia desde el origen del incendio,m	Intensidad térmica, kW/m ²	Tiempo de exposición, s
Intervención	–	–	–
Alerta	7	6.4	15

TABLA 6.14. Zonas de planificación y otros datos relevantes para el escenario 2DF (caudal de fuga 30 kg/s)

Zonas de planificación	Distancia desde el origen del incendio,m	Intensidad térmica, kW/m ²	Tiempo de exposición, s
Intervención	–	–	–
Alerta	22	5.6	15.5

Como puede observarse, al aplicar el modelo de "comportamiento de la población ante incendios" no se alcanza el valor de dosis correspondiente a la zona de intervención en ninguno de los escenarios evaluados, incluso partiendo de distancias próximas al dardo. Este resultado confirma que la peligrosidad de este incendio está condicionada más por la dirección de la llama que por la intensidad térmica que se produce fuera de ella, sobre todo considerando como elementos vulnerables a los seres humanos, que tienen la capacidad de alejarse del incendio. El planteamiento es diferente cuando se trata de elementos estáticos (materiales, estructuras, equipos...) donde se puede alcanzar "dosis" tanto mayores conforme aumenta el tiempo de duración del incendio.

6.5. Referencia

TNO Safety Software (2000), EFFECTS 4.0. Modelling the effects of accidental release of hazardous substances. TNO.

- A_1 : Parámetro utilizado para determinar los factores de visión en incendios en ausencia de viento, adimensional.
- A_2 : Parámetro utilizado para determinar los factores de visión en incendios con velocidades de aire significativas, adimensional.
- A_{dir} : Parámetro de la ecuación 4.72.
- A^* : Parámetro de proporcionalidad de la ecuación 4.71.
- B_1 : Parámetro utilizado para determinar los factores de visión en incendios en ausencia de viento, adimensional.
- B_2 : Parámetro utilizado para determinar los factores de visión en incendios con velocidades de aire significativas, adimensional.
- C_1 : Parámetro utilizado para determinar los factores de visión en incendios con velocidades de aire significativas, adimensional.
- C' : Exponente de la ecuación 4.49, adimensional.
- D : Dosis de radiación térmica, $(W/m^2)^{4/3}s$ o $(kW/m^2)^{4/3}s$.
- D_I : Dosis de radiación térmica que producen quemaduras de primer grado, $(W/m^2)^{4/3}s$ o $(kW/m^2)^{4/3}s$.
- D_{II} : Dosis de radiación térmica que producen quemaduras de segundo grado, $(W/m^2)^{4/3}s$ o $(kW/m^2)^{4/3}s$.
- D_{III} : Dosis de radiación térmica que producen quemaduras de tercer grado, $(W/m^2)^{4/3}s$ o $(kW/m^2)^{4/3}s$.
- D_1 : Parámetro utilizado para determinar los factores de visión en incendios con velocidades de aire significativas, adimensional.
- D_{bf} : Diámetro de la bola de fuego, m.
- D_{ch} : Diámetro equivalente de un charco, m.
- D_{d1} : Diámetro de la base inferior de un dardo de fuego modelizado como un tronco de cono, m.
- D_{d2} : Diámetro de la base superior de un dardo de fuego modelizado como un tronco de cono, m.
- D_{dm} : Diámetro medio de un dardo de fuego modelizado como un tronco de cono, m.
- D_{esc} : Dosis de escape, $(W/m^2)^{4/3}s$ o $(kW/m^2)^{4/3}s$.
- D_f : Diámetro efectivo de la fuente, ecuaciones 4.41 y 4.42, m.
- D_o : Diámetro de orificio, m.
- D_r : Dosis de reacción, $(W/m^2)^{4/3}s$ o $(kW/m^2)^{4/3}s$.

- E_1 : Parámetro utilizado para determinar los factores de visión en incendios con velocidades de aire significativas, adimensional.
- E : Potencia emisiva radiante por unidad de superficie, W/m^2 .
- E_d : Potencia emisiva radiante por unidad de superficie de los destellos, W/m^2 .
- E_h : Potencia emisiva radiante por unidad de superficie de los humos, W/m^2 .
- F_1 : Parámetro utilizado para determinar los factores de visión en incendios con velocidades de aire significativas, adimensional.
- F : Factor de visión, adimensional.
- F_{bf} : Factor de visión de una bola de fuego, adimensional.
- F_c : Coeficiente de descarga a través de un orificio, adimensional.
- F_h : Factor de visión horizontal, adimensional.
- F_{max} : Factor de visión máximo, adimensional.
- F_v : Factor de visión vertical, adimensional.
- Fr : Número de Froude, ecuación 4.33, adimensional.
- H_{bf} : Altura de una bola de fuego, desde el suelo al centro de la bola, m.
- ΔH_c : Entalpía de combustión, J/kg .
- ΔH_v : Entalpía de vaporización, J/kg .
- I_0 : Intensidad térmica en una posición x_0 respecto al incendio, W/m^2 .
- I : Intensidad de radiación térmica que incide en un receptor, W/m^2 .
- I_{CR} : Intensidad crítica de radiación en materiales, $cal/(cm^2 s)$.
- I_i : Intensidad de radiación térmica instantánea, W/m^2 .
- I_m : Intensidad media de radiación, W/m^2 .
- L : Altura media de las llamas en incendio en charco o depósito, m.
- L_{d0} : Longitud de un dardo de fuego en aire en calma, m.
- L_d : Longitud de un dardo de fuego, m.
- L^* : Distancia desde el orificio de salida del gas hasta el inicio de la combustión del dardo de fuego (distancia de despegue), m.
- L_d^* : Longitud total de un dardo en fuego (desde el orificio de salida hasta el extremo final), m.
- M_g : Masa molecular del gas, $kg/Kmol$.
- N_d : Número de Mach de un gas en el orificio de salida, adimensional.
- P : Probit, adimensional.
- P_e : Presión estática de un gas en el plano del orificio de salida, N/m^2 .
- P_c : Presión parcial del dióxido de carbono en la atmósfera, N/m^2 .
- P_{ext} : Presión exterior (atmosférica), N/m^2 .
- P_{int} : Presión en el interior de un contenedor, N/m^2 .
- P_w : Presión parcial del vapor de agua en la atmósfera, N/m^2 .
- R : Constante universal de los gases, $8.314 J/(mol K)$.
- Re : Número de Reynolds, ecuación 4.32, adimensional.
- Re_{11} : Número de Richardson, ecuación 4.49a, adimensional.
- S_0 : Área de un orificio, m^2 .
- S : Superficie, m^2 .
- S_c : Área de un cilindro de diámetro D_{dm} y altura L_d , m^2 .
- S_{ext} : Área exterior de un incendio, m^2 .

- S_1 : Parámetro geométrico de la ecuación 3.17.
 S_u : Parámetro geométrico de la ecuación 3.17.
 T_0 : Temperatura ambiente, K.
 T : Temperatura, K.
 T_d : Temperatura de un gas al expandirse, K.
 T_e : Temperatura de un emisor, K.
 T_{int} : Temperatura en el interior de un contenedor, K.
 T_r : Temperatura del receptor, K.
 T_s : Temperatura de la superficie, K.
 V_1 : Volumen de líquido vertido, m^3 .
 W : Potencia calorífica, W.
 W_R : Potencia emitida en forma de radiación, W.
 W^* : Fracción másica del combustible de un dardo en una mezcla estequiométrica con aire, adimensional.
 X_{br} : Distancia desde el receptor al centro de una bola de fuego, m.
 Y : Parámetro de la ecuación 4.45, adimensional.
 a : Exponente de la ecuación 4.71.
 a_m : Coeficiente de absorción de radiación térmica de materiales sólidos, adimensional.
 b_{df} : Exponente de la ecuación 4.72.
 c : Calor específico, J/kg K.
 c_{gc} : Calor específico de los gases de combustión, J/kg K.
 c_m : Calor específico de materiales sólidos, cal/g °C.
 c_p : Calor específico a presión constante, J/kg K.
 c_v : Calor específico a volumen constante, J/kg K.
 g : Aceleración de la gravedad, m/s^2 .
 h_r : Valor de L/r en un incendio en charco.
 k_m : Conductividad térmica de materiales, cal/cm s °C.
 m : Masa, Kg.
 m_{br} : Masa total de combustible en una bola de fuego, Kg.
 m' : Caudal másico evaporado desde un charco o depósito por unidad de superficie, Kg/(m^2s).
 m^* : Caudal másico a través de un orificio, Kg/(m^2s).
 r : Radio, m.
 r_{br} : Radio de bola de fuego, m.
 r_c : Valor crítico que limita los regímenes sónico o subsónico de un gas que sale por un orificio, adimensional.
 t_{br} : Tiempo de duración de una bola de fuego, s.
 t_d : Tiempo de duración de un incendio, s.
 t_e : Tiempo de exposición a la radiación térmica, s.
 t_{esc} : Tiempo de escape, s.
 t_m : Tiempo necesario para la ignición de un material, s.
 t_r : Tiempo de reacción al iniciarse un incendio, s.
 u_a : Velocidad del viento, m/s.
 u_d : Velocidad de salida de un gas a través de un orificio, m/s

- v^* : Velocidad adimensional del viento, adimensional.
 x : Distancia, m.
 x_0 : Distancia inicial de un receptor respecto a un incendio, m.
 $x_{1.7}$: Distancia al incendio donde la intensidad de radiación es 1.7 kW/m^2 .
 x_r : Valor de x/r en un incendio en charco, adimensional.
 α : Coeficiente de transferencia de calor por convección, $\text{W/m}^2\text{K}$.
 α_c : Coeficiente de absorción de radiación térmica por parte del dióxido de carbono ambiental, adimensional.
 α_w : Coeficiente de absorción de radiación térmica por parte del vapor de agua ambiental, adimensional.
 α^* : Ángulo de desviación de un dardo de fuego respecto al eje del orificio.
 δ : Altura de líquido en un charco o depósito, m.
 ϵ : Coeficiente de emisión de radiación térmica, adimensional.
 γ : Relación de c_p/c_v , adimensional.
 η : Fracción de la potencia emitida en forma de radiación, adimensional.
 ν_a : Viscosidad cinemática del aire, m^2/s .
 θ : Ángulo definido en cada caso (ecuaciones 4.20, 4.24, 4.25, 4.30, 4.31 y 4.47).
 ρ : Densidad, kg/m^3 .
 ρ_a : Densidad del aire, kg/m^3 .
 ρ_{g0} : Densidad de una gas a la salida de un orificio, kg/m^3 .
 ρ_m : Densidad de materiales sólidos, g/cm^3 .
 ρ_v : Densidad de un combustible gaseoso a presión y temperatura atmosférica, kg/m^3 .
 σ : Constante de Stefan-Boltzman, $5.6703 \cdot 10^8 \text{ J/m}^2\text{sK}^4$.
 τ : Coeficiente de transmisividad atmosférica a la radiación térmica, adimensional.

Índice de tablas

Tabla 1.1.	Tipos de incendios	15
Tabla 1.2.	Causas más frecuentes de la génesis de incendios de hidrocarburos	16
Tabla 1.3.	Localización de los incendios	16
Tabla 1.4.	Origen de grandes incendios en industrias químicas y petroleras	16
Tabla 1.5.	Tipos de energías causantes de la ignición	17
Tabla 1.6.	Productos involucrados	17
Tabla 1.7.	Factores que contribuyen a agravar los daños producidos por un incendio en instalaciones de proceso químico	18
Tabla 3.1.	Relación de mortalidad en función de la edad y del porcentaje de área quemada (<i>Bull, 1971</i>)	42
Tabla 3.2.	Distribución en porcentaje de la piel por zonas para personas con edad superior a 15 años (<i>Brandwonden, 1979</i>)	43
Tabla 3.3.	Intensidades críticas de radiación y temperaturas de ignición para diferentes materiales (<i>TNO, 1989</i>)	46
Tabla 3.4.	Intensidades de radiación máxima tolerable para diferentes materiales (<i>Romano y cols, 1985</i>)	47
Tabla 4.1.	Modelos semiempíricos para estimar la radiación térmica generada en incendios de productos inflamables	49
Tabla 4.2.	Valores de γ y r_c para algunos gases combustibles	53
Tabla 4.3.	Fracciones de energía radiante para incendios de hidrocarburos (<i>Burguess y Hertzberg, 1974</i>)	68
Tabla 5.1.	Tiempos de exposición para alcanzar las dosis de radiación correspondientes a las zonas de intervención [$250 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3}\text{s}$] y de alerta [$115 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3}\text{s}$] para diversas intensidades	78
Tabla 6.1.	Intensidad térmica en función de la distancia al centro del incendio para el escenario 1CH (charco de gasolina de 20 m de diámetro). Duración del incendio: 4.02 horas	87
Tabla 6.2.	Intensidad térmica en función de la distancia al centro del incendio para el escenario 2CH (charco de gasolina de 100 m de diámetro). Duración del incendio: 16.07 horas	87
Tabla 6.3.	Zonas de planificación y otros datos relevantes para el escenario 1CH (incendio de gasolina de 20 m de diámetro)	89

Tabla 6.4. Zonas de planificación y otros datos relevantes para el escenario 2CH (incendio de gasolina de 100 m de diámetro)	90
Tabla 6.5. Intensidad térmica en función de la distancia al centro del equipo afectado y otros datos relevantes para el escenario 1BF (20 Tm de butano)..	91
Tabla 6.6. Intensidad térmica en función de la distancia al centro del equipo afectado y otros datos relevantes para el escenario 2BF (3000 Tm de butano).	91
Tabla 6.7. Zonas de planificación y otros datos relevantes para el escenario 1BF (20 Tm de butano)	94
Tabla 6.8. Zonas de planificación y otros datos relevantes para el escenario 2BF (3000 Tm de butano)	94
Tabla 6.9. Zonas de planificación obtenidas con las metodologías simplificada y general para el escenario 1BF (20 Tm de butano)	96
Tabla 6.10. Zonas de planificación obtenidas con las metodologías simplificada y general para el escenario 2BF (3000 Tm de butano)	96
Tabla 6.11. Intensidades térmicas en función de la distancia al origen del dardo de fuego y otros datos relevantes para el escenario 1DF (caudal fugado 10 kg/s)	97
Tabla 6.12. Intensidades térmicas en función de la distancia al origen del dardo de fuego y otros datos relevantes para el escenario 2DF (caudal fugado 30 kg/s)	98
Tabla 6.13. Zonas de planificación y otros datos relevantes para el escenario 1DF (caudal de fuga 10 kg/s)	100
Tabla 6.14. Zonas de planificación y otros datos relevantes para el escenario 2DF (caudal de fuga 30 kg/s)	100
Tabla I.1. Relación entre el valor de la función PROBIT y el porcentaje de población afectada (TNO, 1989)	110

Índice de figuras

Figura 2.1. Representación esquemática de un incendio en charco modelizado con forma cilíndrica.....	22
Figura 2.2. Evolución de la geometría de la bola de fuego durante su desarrollo (High, 1968).....	27
Figura 2.3. Representación esquemática de un dardo de fuego	30
Figura 3.1. Datos experimentales obtenidos por Buettner (1951b) para alcanzar la sensación de dolor y recta de ajuste.....	36
Figura 3.2. Representación de las ecuaciones 3.3. –datos de Buettner– y 3.5 –TNO (1989)– para quemaduras de primer grado	38
Figura 3.3. Datos experimentales obtenidos por Stoll y Green (1952) y Metha y cols (1973) y recta de ajuste para quemaduras de segundo grado.....	39
Figura 3.4. Representación de las ecuaciones 3.6 y 3.10, para valores umbral de quemaduras de segundo grado	40
Figura 3.5. Representación genérica de la intensidad crítica de radiación para materiales	46
Figura 4.1. Coeficiente de absorción de la radiación térmica para el vapor de agua	55
Figura 4.2. Coeficiente de absorción de la radiación térmica para el dióxido de carbono	55
Figura 4.3. Transmisividad del aire a la radiación térmica en función del producto de la presión parcial del vapor de agua ambiental y de la distancia desde el incendio al receptor	56
Figura 4.4. Idealización de un incendio en charco mediante un cilindro. Las dimensiones indicadas sirven para establecer los factores de visión	58
Figura 4.5. Factor de visión máximo aplicable a un incendio en charco en función de los parámetros x_r y h_r	59
Figura 4.6. Modelo geométrico de incendio en charco con llama inclinada por la acción del viento.....	60
Figura 4.7. Modelo de bola de fuego y parámetros característicos	63
Figura 4.8. Modelo de dardo de fuego, representado por un tronco de cono, desviado del eje del orificio por la acción del viento	63
Figura 6.1. Módulos de cálculo de EFFECTS-4	81
Figura 6.2. Incendios simulados por EFFECTS-4.....	82

Figura 6.3.	Representación de la intensidad térmica frente a la distancia al centro del incendio y recta de ajuste para el escenario 1CH (charco de gasolina de 20 m de diámetro.)	88
Figura 6.4.	Representación de la intensidad térmica frente a la distancia al centro del incendio y recta de ajuste para el escenario 2CH (charco de gasolina de 100 m de diámetro.)	88
Figura 6.5.	Representación de la intensidad térmica frente a la distancia al centro de la bola de fuego y recta de ajuste para el escenario 1BF (20 Tm de butano)	92
Figura 6.6.	Representación de la intensidad térmica frente a la distancia al centro de la bola de fuego y recta de ajuste para el escenario 2BF (3000 Tm de butano)	93
Figura 6.7.	Representación de la intensidad térmica frente a la distancia al origen del dardo de fuego y recta de ajuste para el escenario 1DF (caudal fugado 10 kg/s).	98
Figura 6.8.	Representación de la intensidad térmica frente a la distancia al origen del dardo de fuego y recta de ajuste para el escenario 2DF (caudal fugado 30 kg/s)	99

Anexo

La función PROBIT aplicada a los accidentes de tipo térmico

La respuesta de un grupo de individuos a un mismo tipo de estímulo no es homogénea, presentando un comportamiento que, estadísticamente, se ajusta aproximadamente a una distribución logarítmico-normal. Este tipo de respuesta también se manifiesta cuando se trata de cuantificar los daños provocados por fenómenos peligrosos –toxicidad, explosiones, radiación térmica...–, habiendo sido constatada sobre animales de investigación y seres humanos, aunque en este último caso la distribución es más amplia, lo que demuestra la mayor heterogeneidad de los humanos.

Finney (1971) ha propuesto una metodología simplificada para cuantificar los daños sobre poblaciones a través de la función PROBIT (PROBAbility unIT) –*P*– relacionándola linealmente con el logaritmo de la magnitud que provoca el daño –*z*– en la forma:

$$P = \frac{\ln(z) - \mu_p}{\sigma_p} + 5 \quad (\text{I.1})$$

donde μ_p y σ_p representan la media y la desviación típica de la distribución. La forma habitual de expresar la ecuación anterior utilizada en los análisis de consecuencias viene dada mediante:

$$P = k_1 + k_2 \ln(z) \quad (\text{I.2})$$

donde k_1 y k_2 , son parámetros constantes para cada tipo de daño, que deben determinarse experimentalmente.

En este caso, el parámetro z de la ecuación I.2 coincide con la dosis de radiación:

$$D = I^{4/3} t_e \quad (\text{I.3})$$

comentada en el texto de esta Guía Técnica.

Así, según *TNO (1989)*, para personas desprovistas de ropa se verifica:

Para quemaduras de primer grado:

$$P = -39.38 + 3.0186 \ln(I^{4/3} t_e) \quad (I.4)$$

Para quemaduras de segundo grado:

$$P = -43.14 + 3.0186 \ln(I^{4/3} t_e) \quad (I.5)$$

Para quemaduras de tercer grado:

$$P = -36.38 + 2.56 \ln(I^{4/3} t_e) \quad (I.6)$$

A partir del valor de cada función PROBIT se determina el porcentaje de la población expuesta que resultará afectada por el daño considerado. La tabla I.1, que es aplicable a cualquier tipo de daño, recoge la relación de la función PROBIT y el mencionado porcentaje -TNO (1989)-.

TABLA I.1. Relación entre el valor de la función PROBIT y el porcentaje de población afectada (TNO, 1989)

		Entrada de unidades de % de afectados										
		%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Entrada de decenas de % de afectados	0	-	2.67	2.95	3.12	3.25	3.36	3.45	3.52	3.59	3.66	
	10	3.72	3.77	3.82	3.87	3.92	3.96	4.01	4.05	4.08	4.12	
	20	4.16	4.19	4.23	4.26	4.29	4.33	4.36	4.39	4.42	4.45	
	30	4.48	4.50	4.53	4.56	4.59	4.61	4.64	4.67	4.69	4.72	
	40	4.75	4.77	4.80	4.82	4.85	4.87	4.90	4.92	4.95	4.97	
	50	5.00	5.03	5.05	5.08	5.10	5.13	5.15	5.18	5.20	5.23	
	60	5.25	5.28	5.31	5.33	5.36	5.39	5.41	5.44	5.47	5.50	
	70	5.52	5.55	5.58	5.61	5.64	5.67	5.71	5.74	5.77	5.81	
	80	5.84	5.88	5.92	5.95	5.99	6.04	6.08	6.13	6.18	6.23	
	90	6.28	6.34	6.41	6.48	6.55	6.64	6.75	6.88	7.05	7.33	
		%	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
		99	7.33	7.37	7.41	7.46	7.51	7.58	7.65	7.75	7.88	8.09

Cuando un mismo fenómeno peligroso provoque distintos niveles de daño, como ocurre en este caso, pueden obtenerse resultados aparentemente anómalos que deben interpretarse.

Así, por ejemplo, considerando un valor de intensidad de 5000 W/m² y 180 s, aplicando las ecuaciones I.4 a I.6 y la tabla I.1, se obtiene:

Quemaduras de primer grado:

$$P = 10.1 \quad \text{Población afectada} = 100 \%$$

Quemaduras de segundo grado:

$P = 6.81$ Población afectada = 96 %

Quemaduras de tercer grado (letalidad):

$P = 5.98$ Población afectada = 84 %

La suma de los porcentajes de la población afectada supera el 100 %. Esto se interpreta considerando que un nivel de daño superior está incluido en el inmediato inferior, por lo que los porcentajes corregidos se calculan de la forma siguiente:

1.- Se parte del correspondiente al nivel de daño superior, que no se modifica. En este caso corresponde a la letalidad del 84 % de población.

2.- Los afectados por quemaduras de segundo grado se determinan por diferencia de los porcentajes 2 y 3 y así sucesivamente. En este caso se obtiene:

Quemaduras de segundo grado: $96 - 84 = 12\%$

Quemaduras de primer grado: $100 - 96 = 4\%$.

Ahora la suma de porcentajes ($84 + 12 + 4$) coincide con el correspondiente al nivel de daño inferior, que en este caso es la totalidad de la población.

1.1. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Finney, D.L.; (1971). *Probit analysis*. Cambridge University Press, London.

TNO; (1989). *Methods for the determination of possible damage*. -"The green book"- CPR 16E. CIP-data of the Royal Library. The Hague, The Netherlands.