

**SOCIETAT CATALANA**  
**DE TECNOLOGIA**  
**ELS INCENDIS**  
**D'HIDROCARBURS,**  
**A CÀRREC**  
**D'EULÀLIA PLANAS CUCHI,**  
**DEL CENTRE D'ESTUDIS**  
**DEL RISC TECNOLÒGIC**  
**DE LA UNIVERSITAT**  
**POLITÈCNICA DE CATALUNYA**

A la indústria en general i, més particularment, a la indústria química, un dels accidents més freqüents són els incendis. I els combustibles amb més contingut energètic i que més sovint s'hi troben involucrats són els hidrocarburs.

En la conferència s'exposarà, en primer lloc, una anàlisi històrica dels accidents ocorreguts, que posarà de manifest la importància dels incendis d'hidrocarburs i la freqüència relativa dels diversos tipus d'incendi: de bassa, de doll, de núvols de vapor, etc. A continuació s'exposaran les principals característiques dels hidrocarburs com a combustibles i dels diversos tipus d'incendi. Finalment s'analitzaran els models matemàtics més adients per a l'estimació dels efectes i de les conseqüències d'aquests tipus d'accidents.

## 1. INTRODUCCIÓ

El foc té moltes cares diferents, i aquest fet s'ha posat clarament de manifest al llarg d'aquest cicle de conferències «El foc i el medi», organitzat per l'Institut d'Estudis Catalans. El foc, aquest fenomen de despreniment de calor i llum produït per la combustió d'un cos, ha influït considerablement en l'evolució de la humanitat des que fou descobert ara fa milers d'anys (a Catalunya el fogar més antic descobert data de fa 53.000 anys; els més antics es troben a la Xina i són de fa uns 460.000 anys). Nogensmenys, el foc també ha estat, des del seu descobriment, un element de destrucció, en alguns casos voluntari (com en les guerres o en la creació de zones de cultiu), però en molts altres involuntari. La cara més violenta i destructiva del foc són els incendis.

D'incendis, n'hi ha de diversos tipus, tot i que se'n pot fer una classificació genèrica en tres grans grups: els incendis forestals, els incendis en recintes tancats (edificis i túnels, per exemple) i els incendis industrials.

Dels diversos accidents que poden ocórrer en una indústria, l'incendi és el que, en termes generals, té un radi d'acció més reduït. Malgrat això, els seus efectes poden ser temibles, ja que la radiació tèrmica pot afectar altres parts de la planta i generar altres accidents. D'altra banda, el fum després pot complicar notablement l'actuació dels equips d'intervenció i sotmetre'ls a un perill addicional (manca de visibilitat o intoxicació).

Un altre element important és que sovint incendis i explosions es produeixen alhora. Això vol dir que les instal·lacions de protecció hauran d'estar especialment dissenyades per a suportar aquests dos accidents.

És evident l'interès que té la predicció dels efectes d'un incendi, tant pel que fa a l'establiment de distàncies de seguretat com per a la determinació dels cabals de refrigeració necessaris per a protegir els equips sotmesos a radiació. En definitiva, la modelització matemàtica d'un incendi permet la predicció dels possibles danys a persones i instal·lacions, i l'establiment de les mesures que cal prendre per a reduir aquests danys.

361

### 1.1. Els hidrocarburs

Els hidrocarburs són compostos orgànics formats per carboni i hidrogen. Els àtoms de carboni poden unir-se i formar cadenes més o menys llargues, per mitjà d'enllaços simples, dobles o triples, i les valències que resten lliures són saturades amb hidrogen. Hom distingeix els hidrocarburs *acíclics*, de cadena oberta, dels *cíclics*, de cadena tancada. Els acíclics, anomenats també *alifàtics*, poden ésser saturats o insaturats, i llurs cadenes poden ésser lineals (*derivats normals*) o ramificades (*isoderivats*). Els hidrocarburs saturats només tenen enllaços simples i hom els anomena també *alcans* o

*parafines*. Els hidrocarburs insaturats presenten dobles i triples enllaços en les molècules i, per tant, contenen menys àtoms d'hidrogen que els hidrocarburs saturats del mateix nombre de carbonis. Hom els divideix en *alquens*, *etilènics* o *olefines* i *alquins* o acetilènics, segons que tinguin dobles o triples enllaços. Els hidrocarburs cíclics formen dos grans grups: els *alicíclics*, anomenats també *naftènics*, que comprenen els cicloalcans, els cicloalquens i els cicloalquins, de propietats semblants a les parafines, i els *aromàtics*, que tenen propietats especials, a causa de l'estructura de l'anell benzènic. Els hidrocarburs són obtinguts principalment del gas natural (saturats de baix pes molecular i metà, età, propà i butà), del petroli (parafines, aromàtics i alicíclics) i del quitrà de l'hulla (preferentment aromàtics: benzè, toluè, xilè, naftalè, antracè, etc.) i, en menys quantitat, de les ceres, les resines i els olis essencials d'origen vegetal. Els hidrocarburs naturals es formen per maduració de la matèria orgànica disseminada en roques sedimentàries; segons les condicions de la maduració es produeix petroli o gas natural. Hom obté una àmplia gamma d'hidrocarburs per destil·lació del petroli en brut (vegeu la taula 1).

### 1.2. Anàlisi històrica

L'anàlisi històrica d'accidents és una tècnica identificativa orientada a la recerca d'informació d'accidents industrials succeïts en el passat (Casal *et al.*, 1999). Aquesta tècnica d'anàlisi és essencialment qualitativa, però també permet extreure resultats quantitius si el nombre d'accidents és suficientment elevat per a permetre una anàlisi estadística significativa. La tècnica es basa en l'existència de reculls d'accidents en forma de bancs de dades on es troba emmagatzemada la informació relativa als accidents (tipus, pro-

ducte involucrat, conseqüències, etc.). Les dades utilitzades en aquesta anàlisi històrica s'han extret de la base de dades MHIDAS (Major Hazard Incident Data Service, 2003) desenvolupada pel Safety and Reliability Directorate (Regne Unit), la qual inclou accidents ocorreguts a la indústria química i en el transport de mercaderies perilloses des de l'inici del segle XX fins al mes d'octubre de 2003. La versió que s'ha utilitzat per a fer aquest estudi conté 13.341 registres, que corresponen a 11.790 accidents.

TAULA 1. *Característiques i nom dels hidrocarburs segons el nombre de carbonis*

<i>Estat a temperatura ambient</i>	<i>Nombre de carbonis</i>	<i>Nom</i>	<i>Temperatura d'ebullició (°C)</i>
Gas	C <sub>1</sub>	Metà	-107
	C <sub>2</sub>	Età	-67
	C <sub>3</sub>	Propà	-43
	C <sub>4</sub>	Butà	-18
Líquid lleuger	C <sub>5</sub> a C <sub>7</sub>	Nafta lleugera, dissolvents i fluids de neteja en sec	40-70
Líquid	C <sub>6</sub> a C <sub>12</sub>	Gasolina	60-150
	C <sub>10</sub> a C <sub>15</sub>	Querosè	120-300
	C <sub>10</sub> a C <sub>20</sub>	Gasoli i fuel	250-350
Líquid dens	C <sub>16</sub> a C <sub>20</sub>	Lubrificants, grasses semisòlides, vaselina	> 300
Sòlid	> C <sub>20</sub>	Parafines i asfalts	

Els accidents enregistrats es poden classificar en una primera aproximació en quatre tipus generals: fuga, incendi, explosió i núvol de gas. La taula 2 mostra la distribució dels registres en funció del tipus general d'accident. Com es pot observar, l'incendi és, després de la fuga, l'accident que presenta un nombre més gran de registres.

La base de dades MHIDAS considera set tipus diferents d'origen. Si s'agafen els registres en els quals s'ha pro-

duït un incendi i es classifiquen en funció del seu origen, s'obtenen els resultats de la taula 3, on es pot veure que el 77 % dels incendis es produeixen en plantes de procés, d'emmagatzematge o durant el transport.

TAULA 2. *Distribució en funció del tipus general d'accident*

<i>Tipus d'accident</i>	<i>Nre. d'accidents</i>	<i>Percentatge*</i>
Fuita	6.369	59,7
Incendi	3.912	36,7
Explosió	3.117	29,2
Núvol de gas	940	8,8
Total	14.337	134,4

\* Aquest percentatge està calculat dividint pel nombre d'accidents de la base de dades (11.790), dels quals s'ha restat els tipus d'accident que són desconeguts (1.124).

TAULA 3. *Distribució dels registres corresponents a incendis segons l'origen de l'accident*

<i>Origen</i>	<i>Nre. de registres</i>	<i>Percentatge</i>
Planta de procés	1.212	31
Transport	1.036	26,5
Planta d'emmagatzematge	765	19,6
Domèstic/comercial	313	8
Càrrega i descàrrega	275	7
Magatzem de mercaderies	199	5
Desconegut	62	1,6
Magatzem de residus	50	1,3
Total	3.912	100

La base de dades MHIDAS distingeix els set tipus d'incendis següents: bassals de foc, foc en un dipòsit, incendi d'un núvol de gas (flamarada), doll de foc, bola de foc, tempesta de foc i incendi indeterminat. La taula 4 mostra la distribució dels registres corresponents als incendis segons la seva tipologia.

TAULA 4. *Distribució dels registres segons el tipus d'incendi*

<i>Tipus d'incendi</i>	<i>Nre. de registres</i>	<i>Percentatge</i>
Incendi indeterminat	3.412	87,2
Incendi d'un dipòsit	139	3,6
Bola de foc	124	3,2
Incendi d'un núvol de vapor	118	3
Incendi d'un bassal	100	2,6
Doll de foc	17	0,4
Tempesta de foc	2	0,05
Total	3.912	100

Es pot observar que en la majoria dels casos no s'ha pogut establir el tipus d'incendi, però si s'agafen aquells en què sí que s'ha pogut determinar —exceptuant els dolls i les tempestes de foc, que són més minoritaris—, veiem que presenten una freqüència semblant.

També resulta interessant la classificació dels incendis segons l'estat físic del producte involucrat. S'observava que aproximadament en un 60% dels accidents la substància involucrada es trobava en estat líquid; en un 30%, en estat gasós (gasos i gasos líquats a pressió o criogènicament), i el 10% restant, en estat sòlid.

365

## 2. TIPUS D'INCENDIS D'HIDROCARBURS

D'incendis d'hidrocarburs, n'hi ha de molts tipus diferents, tal com ja s'ha pogut apreciar en l'apartat 1.2. Que tingui lloc un tipus d'incendi o un altre dependrà bàsicament de l'estat de la substància (gas, líquid o sòlid) i de les característiques del vesselament. Generalment, perquè hi hagi un incendi s'ha de produir la pèrdua de contenció d'un producte inflamable, i aquesta pot tenir lloc per la ruptura total o parcial del recipient que el conté (dipòsit, canonada, vàlvula, etc.). A continuació es fa una classificació i descripció dels diversos tipus incendis (Planas, 1998).

## 2.1. Incendi d'un líquid

Quan es produeix la fuga d'un líquid inflamable, es poden generar diferents tipus d'incendi, depenent del tipus de fuga i d'on té lloc:

- bassals de foc sobre el sòl (*pool fire on land*)
- bassals de foc sobre l'aigua (*pool fire on water*)
- incendi d'un dipòsit (*tank fire*)
- incendis en moviment (*running fire*).

### 2.1.1. Bassals de foc sobre el sòl

Aquest tipus d'incendi té lloc quan es produeix la ignició d'una fuga o vessament d'un líquid inflamable sobre el sòl. Quan la fuga és instantània (per exemple, en la ruptura total d'un dipòsit), el líquid vessat s'anirà escampant fins que trobi una barrera o fins que s'hagi consumit tot el combustible en l'incendi. En el cas d'una fuga contínua (per exemple, en la ruptura parcial d'una canonada), el bassal anirà creixent fins que la velocitat de combustió iguali el cabal de vessament; s'arriba aleshores a un diàmetre d'equilibri, que es manté mentre no s'aturi la fuga. D'altra banda, si el líquid queda retingut dins algun recipient o àrea protegida, com pot ser una cubeta, aleshores les mides del bassal no dependran tant de si la fuga és instantània o contínua.

En aquest tipus d'incendi, el líquid rep calor de la flama per radiació i convecció, i alhora també perd o guanya calor per conducció des del sòl. Es pot dir que hi ha un mecanisme de retroalimentació mitjançant el qual es desenvolupa l'incendi, ja que la calor provinent de les flames vaporitza combustible i aquest fa que es puguin mantenir les flames. Aquest mecanisme de retroalimentació a través del qual la flama governa el seu propi subministrament de combustible



es pot considerar característic dels incendis de bassals. El vapor que abandona el basal és escalfat ràpidament per les flames. Alhora les flames arrossegueu l'aire de l'entorn, i això crea grans turbulències on es barregen l'aire amb el combustible no cremat i els gasos calents producte de la combustió. En aquest tipus d'incendi la combustió és generalment incompleta, es produeix sutge i s'emet calor en forma de radiació.

### 2.1.2. Bassals de foc sobre l'aigua

Aquest és un escenari molt similar al de l'apartat anterior, amb la particularitat que el vessament de combustible es produeix sobre la superfície de l'aigua, generalment del mar. És un cas relativament freqüent al voltant de vaixells petrolers i plataformes petrolíferes.

Un factor important que cal tenir en compte en aquest cas és que les pèrdues de calor cap a l'aigua seran molt importants; això fa que la temperatura del basal no sigui tan gran i l'evaporació sigui menor que en el cas anterior, fins al punt que sovint la flama no es pot mantenir. D'altra banda, si la ignició del basal no es produeix de manera immediata, el basal anirà augmentant el seu diàmetre, però alhora reduirà el seu gruix; pot arribar un moment que el gruix sigui prou petit per a fer que la ignició esdevingui impossible —aquest gruix sol estar al voltant d'1,25 mm (Scandpower-Sintef, 1992). En el cas dels combustibles que es troben emmagatzemats en condicions criogèniques, el comportament descrit varia considerablement, ja que la transferència de calor es produeix des de l'aigua cap al basal i no en sentit contrari, i pot arribar a igualar la calor transferida de la flama cap al basal.

Estudiar i modelitzar el comportament d'aquest tipus

d'incendis és molt complex. Cal tenir en compte les condicions especials de l'entorn i el fet que el vent i els corrents marins confereixen al basal formes molt variades i normalment allargades; a més, les propietats físiques del combustible van variant amb el temps a causa de l'evaporació dels components més volàtils, la dissolució en l'aigua i la degradació biològica.

### 2.1.3. Incendi d'un dipòsit

Els incendis en dipòsits d'emmagatzematge d'hidrocarburs són relativament freqüents i involucren, generalment, grans quantitats de producte (un sol dipòsit pot arribar a contenir uns 500.000 barrils,<sup>1</sup> uns 80.000 m<sup>3</sup>). La causa més freqüent d'aquest tipus d'incendi és el sobrecompliment, que pot fer esclatar la zona del vapor i, al seu torn, fer que salti la tapa del dipòsit i l'incendi quedi retingut dins d'aquest. Una vegada iniciat, l'incendi tindrà unes característiques molt semblants als dos descrits anteriorment; la diferència en aquest cas radica en la durada que aquest pot tenir, que pot arribar a ser d'alguns dies, i en el fet que sovint es desenvolupa un fenomen extremament perillós —tant per la magnitud de les seves conseqüències com per la seva difícil predicció— anomenat *boilover*.

El *boilover* es pot produir sobretot en dipòsits que contenen barreges de diversos hidrocarburs. En iniciar-se l'incendi, la capa superficial d'hidrocarburs es va escalfant per la radiació, de manera que s'inicia l'ebullició, la qual provoca un procés de destil·lació: els components més volàtils són els que passen preferentment al vapor i alimenten la flama. D'aquesta manera, la capa superficial es va enriquint

1. Un barril Brent (bbl) són 0,159 m<sup>3</sup>.

en els components més pesants, alhora que en va augmentant la temperatura. A mesura que passa el temps, aquesta capa rica en productes pesants augmenta de gruix i es fa més profunda; la velocitat a la qual augmenta el seu gruix és més gran que la velocitat a la qual retrocedeix la superfície del líquid contingut en el dipòsit. D'aquesta manera, una «ona de calor» es propaga cap a la part inferior del dipòsit. Si aquest conté aigua, en algun moment aquesta ona de calor (a una temperatura superior a la d'ebullició de l'aigua) arribarà a la capa aquosa i farà que es vaporitzi. La generació pràcticament instantània d'una gran quantitat de vapor, amb un volum específic molt superior al líquid, provocarà una violenta erupció, amb la formació d'una bola de foc i la projecció de combustible inflammat cap a l'exterior, que pot arribar a distàncies considerables.

No tots els combustibles són susceptibles d'experimentar el fenomen del *boilover*; en general, aquest està associat amb els combustibles formats per una barreja de components amb una àmplia gamma de temperatures d'ebullició (un bon exemple n'és el petroli cru).

369

#### 2.1.4. Incendis en moviment

Els incendis en moviment tenen lloc quan el líquid inflamable es vessa sobre una superfície inclinada. Si es produeix la ignició, l'incendi es desplaçarà cap allà on es desplaça el líquid. Aquest tipus d'incendis són molt perillosos, ja que en pocs moments poden arribar a tenir grans dimensions i cobrir zones molt grans dins una planta.

Per les seves característiques són molt difícils d'estudiar i avui dia el seu comportament és encara poc conegut. El que s'ha comprovat experimentalment és que requereixen cabals més grans d'aigua (o escuma) per a la seva extinció, si

es compara amb un incendi de característiques similars però estàtic.

## 2.2. Incendi d'un gas

Quan es produeix la fuga d'un gas o vapor inflamable es poden generar, essencialment, tres tipus d'incendi:

- incendi d'un núvol de gas (*flash fire*)
- incendi d'un doll de gas (*jet fire*)
- bola de foc (*fireball*).

### 2.2.1. Incendi d'un núvol de gas

Aquest tipus d'incendi té lloc quan es produeix la ignició retardada del vessament d'un gas o un vapor inflamable que forma un núvol que es va dispersant. És difícil definir el punt de transició entre l'explosió i l'incendi d'un núvol de vapor. En un incendi, els efectes de la pressió es poden considerar negligibles; per això, cal que no hi hagi obstacles o un confinament que puguin accelerar el front de la flama, prop del punt d'ignició. La flama es mou —a velocitats d'entre 5 i 30 m/s— des del punt d'ignició cap al punt d'emissió del gas, a través de les zones del núvol on el gas es troba dins els límits d'inflamabilitat. Aquest tipus d'incendi té una durada molt curta, generalment inferior a un minut.

En determinades situacions, l'incendi d'un núvol de vapor derivarà en una explosió, és a dir, es generarà una ona de sobrepressió. Perquè això succeeixi, la velocitat de propagació del front de flama ha de ser gran; com més gran sigui, més grans seran els efectes de l'explosió. Hi ha dos mecanismes bàsics per a la propagació de la flama en una explosió: la deflagració i la detonació. Generalment, quan es produeix

l'explosió d'un núvol de vapor és pel mecanisme de deflagració, on les velocitats del front de flama poden estar entre 100 i 1.000 m/s (que generen sobrepressions d'entre 1 i 10 bar aproximadament). Iniciar directament l'explosió d'un núvol de vapor com una detonació és extremament difícil, ja que es requereixen unes condicions de turbulència i homogeneïtat elevades en el núvol, així com una energia d'ignició gran, que difícilment es donen en situacions reals. Sí que es pot produir, però, la transició des d'una deflagració cap a una detonació si la turbulència en el núvol és gran. En una detonació les velocitats del front de flama poden ser aproximadament de 1.700 a 2.100 m/s (que generen sobrepressions d'entre 18 i 22 bar), amb la qual cosa superen entre dues i cinc vegades la velocitat del so (CPR 14E, 1997).

### 2.2.2. Incendi d'un doll de gas

371

Aquest tipus d'incendi té lloc quan es produeix el vessament accidental de vapors o gasos inflamables en un cert moment inicial. Aquest tipus d'incendi no sempre és accidental; en el cas de les torxes de producció s'utilitzen per a evacuar subproductes no volguts, i en les torxes de procés, per a evacuar gasos a través de vàlvules de seguretat. Pràcticament no hi ha diferències entre els dolls generats de manera accidental i els intencionats; potser cal destacar que, en aquest darrer cas, els gasos surten a través d'una vàlvula i això fa que puguin assolir, si es vol, velocitats supersòniques. En el cas dels dolls accidentals, el gas surt a través d'un orifici en un dipòsit, una canonada trencada o una brida, i la velocitat màxima que pot assolir el gas en aquestes condicions és la sònica.

Un factor important que els distingeix dels incendis de basal és que aquí no hi ha retroalimentació de la flama i, per tant, el cabal de gas que passa a la flama no depèn d'aques-

ta, sinó únicament de les característiques del vessament. Depenent del tipus de combustible emès i de la seva velocitat de sortida, s'obtenen dolls de característiques diferents.

### 2.2.3. Bola de foc

Aquest tipus d'incendi té lloc quan es produeix la despressurització sobtada d'un gas líquid inflamable que ha estat sobreescalfat, generalment per l'acció d'algun altre incendi sobre el recipient que el conté i que provoca la ruptura d'aquest a causa de la disminució de la resistència de l'acer amb la temperatura. Aquesta despressurització provoca la vaporització del líquid, que serà abocat a l'exterior en forma de barreja bifàsica líquid/vapor, la qual immediatament s'inflamarà i donarà lloc a una foguera de forma aproximadament hemisfèrica que s'estendrà inicialment arran de terra. Aquesta massa de combustible només pot cremar en la seva superfície perquè el seu interior, molt ric en combustible i pràcticament sense aire, es troba fora dels límits d'inflamabilitat. Posteriorment, la turbulència de l'incendi fa que vagi entrant aire dins la massa de combustible. Al mateix temps, la radiació procedent de les flames va evaporant les gotes de líquid i escalfant el conjunt. Com a resultat de tot aquest procés, la massa en ignició va augmentant de grandària de manera turbulenta, adquireix una forma més o menys esfèrica i va ascendint deixant una cua semblant en la forma a la del típic bolet d'una explosió nuclear.

Aquest tipus d'incendi va generalment associat amb l'explosió BLEVE (*boiling liquid expanding vapor explosion*), ja que l'esclat del dipòsit i la vaporització sobtada del líquid, amb el consegüent increment extraordinari de volum que experimenta aquest, generen una ona de pressió d'efectes molt greus. L'accident BLEVE - bola de foc és tractat de

manera específica en una altra ponència dins d'aquestes jornades i, per tant, aquí no s'hi aprofundirà més.

### 2.3. *Incendi d'un sòlid*

En el cas dels hidrocarburs, aquest tipus d'incendi és poc freqüent en el sector industrial (tal com s'ha vist en l'anàlisi històrica) i, tot i que davant d'un incendi generalitzat aquests compostos també cremarien, pràcticament mai no en són els iniciadors. L'incendi de sòlids és més típic trobar-lo en edificis, on hi ha combustibles sòlids de diversa tipologia, alguns dels quals derivats dels hidrocarburs, com poden ser els plàstics. És per aquest motiu que no seran tractats aquí.

## 3. CÀLCUL D'EFECTES I CONSEQÜÈNCIES

373

### 3.1. *Efectes derivats d'un incendi*

L'efecte més important dels incendis és la calor que emeten i que incidirà sobre un element receptor, com poden ser les persones o altres instal·lacions. Cal fer aquí la distinció entre el cas en què l'element receptor estigui immers en les flames —aleshores rep calor per radiació i convecció— o que sigui a una certa distància d'aquestes —rep calor únicament per radiació. En general, els models més utilitzats per a determinar els efectes derivats dels incendis estan pensats per a objectes situats a una certa distància de la flama i, per tant, tenen en compte únicament la radiació emesa per aquesta. Dins d'aquest grup, cal distingir-ne tres categories: els models semiempírics, els models CFD (*computational field dynamics*) i els models integrals (Muñoz *et al.*, 2003).

Els models semiempírics són els més simples i més àmpliament utilitzats en el camp de l'anàlisi de risc. Es basen en dades experimentals sovint extretes a escala de laboratori, que són posteriorment extrapolades a escala real. Els models del tipus CFD són els més complexos. S'hi resolten les equacions de Navier-Stokes mitjançant mètodes numèrics incorporant submodels que descriuen els processos físics i químics que tenen lloc en el foc. Per causa de la seva complexitat, aquests models no s'utilitzen en el camp de l'anàlisi del risc a la indústria. Els models integrals són un compromís entre els dos anteriors, tot i que estan formulats d'una manera més propera als CFD i això ha fet que tampoc no hagin estat implementats en el camp de l'anàlisi del risc.

Si ens centrem, doncs, en els models semiempírics, en el camp dels incendis d'hidrocarburs cal destacar dos models: el model de font puntual i el model del cos sòlid, els quals es descriuen a continuació.

### 3.1.1. Model de font puntual

El model de font puntual suposa que la flama es pot representar com un punt que emet energia en totes direccions. Considera també que l'energia emesa per la flama en forma de radiació és una fracció de l'energia alliberada en la combustió i que la seva intensitat disminueix proporcionalment a l'invers de la distància entre el punt emissor i l'objecte receptor [1].

$$\dot{q}'' = \frac{Q_r}{4\pi x^2} \quad [1]$$

La manera de determinar l'energia emesa en forma de radiació ( $Q_r$ ) depèn del tipus d'incendi: en el cas de bassals i



dolls de foc caldria utilitzar [2], mentre que per a boles de foc, que tenen una durada limitada, [3] seria l'adequada.

$$Q_r = \eta \cdot \dot{m} \cdot \Delta H_c \quad [2]$$

$$Q_r = \eta \cdot \frac{M \cdot \Delta H_c}{t_f} \quad [3]$$

Un dels paràmetres més importants d'aquest model és la fracció d'energia que s'emet en forma de radiació,  $\eta$ , que s'ha d'obtenir a partir de dades experimentals resultants de mesures fetes amb radiòmetres o càmeres infraroges. En el cas dels incendis de bassals,  $\eta$  depèn principalment del tipus de combustible i de les dimensions de la flama. En el cas dels dolls de foc, a més de dependre d'aquests dos paràmetres, depèn també de la velocitat de sortida del gas per l'orifici ( $u_j$ ); a velocitats baixes, les flames (laminars) generen més fum perquè la barreja aire/combustible és pobra, mentre que a velocitats altes les flames són turbulentes i generen menys fum; això fa que aquestes darreres emetin més radiació, ja que el fum actua com a atenuant. A la taula 5 es recullen alguns valors obtinguts experimentalment per a incendis de bassals i dolls de foc (Muñoz *et al.*, 2003).

375

En el cas de les boles de foc, conèixer el paràmetre  $\eta$  de manera experimental és molt més difícil i això fa que sigui el paràmetre, de tots els que apareixen al model de font puntual, que presenta una incertesa més gran. L'equació [4] mostra una correlació per a determinar la fracció d'energia radiant en boles de foc, en funció de la pressió en el recipient just abans que es produeixi l'esclat d'aquest (Roberts, 2000).

$$\eta = 0,27 \cdot P_0^{0,32} \quad [4]$$

TAULA 5. *Fracció d'energia emesa en forma de radiació i poder emissiu de les flames*

<i>Típus d'incendi</i>	<i>Combustible</i>	<i>Fracció radiant, <math>\eta</math> (%)</i>	<i>Poder emissiu</i>	<i>Observacions (kW/m<sup>2</sup>)</i>
Dolls de foc	Hidrogen	20		
	Metà	20	157	
	Età		362	
	Etilè	25	498	
	Propà	30	336	
	n-Butà	30	383	
	Pentà	40		
	Propilè		279	
Bassals de foc	Benzè	37		
	Butà	19,9-26,9		$D = 0,3-0,76$ m
	Etanol	20		
	Gasolina	13		
	Petrolí cru	60,1-10	60-130	$D = 1-10$ (*)
	Hexà	40		
	JP5		30-50	$D = 1-30$ m
	Querosè		10-25	$D = 30-80$ m
	GNL (sobre aigua)	12-31		$D = 8,5-15$ (*)
	GNL (sobre el sòl)	36	150-200	$D = 20$ m
	GLP (sobre el sòl)		60-160	$D = 2-17$ m
Metanol	17,7		$D = 1,22$ m	
		70	$D = 3$ m	

\* Els incendis de diàmetre més gran irradien menys a causa de l'atenuació que provoca el fum.

El model de font puntual presenta l'inconvenient de predir en excés el flux de calor en punts molt propers a la flama i, per tant, no es pot utilitzar per a determinar distàncies de seguretat per a persones o equipament. D'altra banda, el model pot resultar relativament acurat per a punts allunyats, que en el cas dels bassals de foc es podrien correspondre amb distàncies entre la flama i l'observador cinc vegades superiors al diàmetre del bassal. Un altre inconvenient que presenta aquest model és que no té en compte la forma de la flama, tot i que això es pot resoldre suposant una font amb

múltiples punts, cada un dels quals emet una part de l'energia total irradiada.

### 3.1.2. Model del cos sòlid

Aquest és el model més utilitzat per a calcular la radiació que incideix sobre un objecte que es troba a una certa distància de la flama, independentment que aquesta distància sigui gran o petita. En aquest model, la flama es representa com un cos gris que emet radiació tèrmica des de la seva superfície [5], i el cos pot prendre diferents formes o geometries segons el tipus d'incendi. Així, en un incendi de basal la flama s'acostuma a representar com un cilindre, mentre que una bola de foc es representa com una esfera:

$$\dot{q}'' = \tau \cdot F \cdot E \quad [5]$$

377

#### 3.1.2.1. Geometria de la flama

Tal com s'ha pogut comprovar a l'apartat 2, cada tipus d'incendi presenta una geometria diferent. Tot i que una flama no és un cos estàtic amb una geometria fixada, per a poder utilitzar el model del cos sòlid cal definir-ne una que s'aproximi tant com sigui possible a la realitat. En el cas dels incendis de basal, la més utilitzada ha estat la geometria cilíndrica, que en el cas que hi hagi vent passa a ser un cilindre inclinat; no-gensmenys, alguns autors han proposat altres geometries (vegeu la figura 1), que tot i permetre resultats més acurats sovint compliquen l'aplicació del model del cos sòlid.

Els paràmetres més importants per a definir la geometria en el cas dels incendis de bassals i en dipòsits són el diàmetre ( $D$ ), la longitud de la flama ( $H$ ) i, en el cas que hi hagi

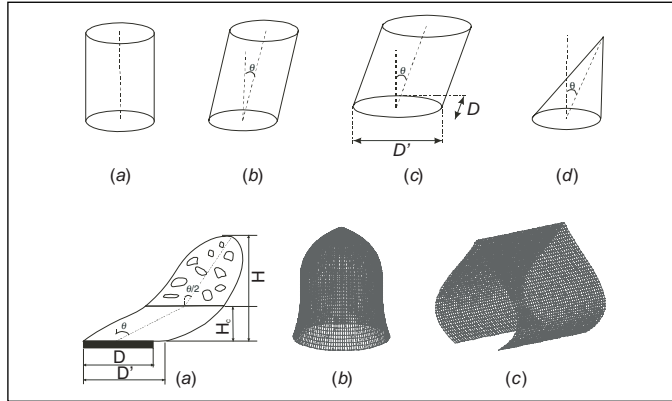


FIGURA 1. Diverses geometries de flama per a incendis de bassals.

378

vent, la seva inclinació ( $\theta$ ) i el desplaçament de la base ( $D'$ ). En el cas dels dols de foc, la flama s'acostuma a representar com un cilindre o bé com un tronc de con (vegeu la figura 2), les dimensions dels quals es determinen a partir de la velocitat del gas a la sortida de l'orifici, del diàmetre d'aquest i de la velocitat del vent.

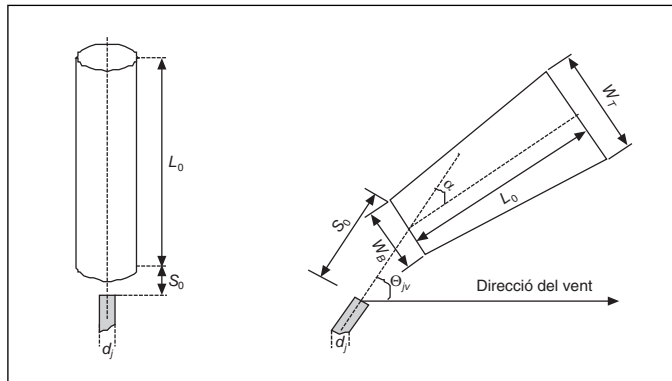


FIGURA 2. Geometries més utilitzades en el cas dels dols de foc.

Pel que fa a les boles de foc, es consideren esferes elevades a una certa altura respecte del sòl. El seu diàmetre i altura depenen en la majoria de correlacions existents de la massa de combustible involucrat en la bola de foc.

En els incendis de núvols de vapor, la geometria de l'incendi en si mateixa no és excessivament important, donada la curta durada que tenen; sí que ho són, però, la posició i la mida del núvol en el moment de produir-se la ignició, ja que això permetrà conèixer l'àrea afectada per la radiació.

### 3.1.2.2. Poder emissiu

El poder emissiu és la quantitat d'energia que emet la flama per unitat de superfície. Suposant que la flama és un cos gris, aquesta energia es pot relacionar amb la temperatura de la flama a través de la llei de Stefan-Boltzmann [6].

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_f^4 - T_a^4) \quad [6]$$

Com que  $T_f > T_a$  aquesta equació se sol simplificar d'acord amb l'equació [7], on l'emissivitat de la flama ( $\varepsilon$ ) i la seva temperatura ( $T_f$ ) cal dir que no són fàcils de determinar. Ambdós paràmetres depenen del tipus de combustible i varien amb la posició i el temps.

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_f^4 \quad [7]$$

Això fa que sovint s'utilitzin expressions empíriques per determinar el poder emissiu (a la taula 5 es poden veure alguns valors experimentals per diferents tipus d'incendis i combustibles). Per a incendis de bassals o dipòsits d'hidrocarburs, on les flames generen molt de fum, les equacions més utilitzades prenen formes semblants a l'equació [8].

$$E = E_{\max} \cdot e^{-S_c D} + E_s \cdot (1 - e^{-S_c D}) \quad [8]$$

En el cas dels dolls de foc i de les boles de foc, el poder emissiu es determina habitualment a partir de l'energia total emesa en la combustió i de la fracció d'energia emesa en forma de radiació.

### 3.1.2.3. *Transmissivitat atmosfèrica*

L'energia emesa per les flames en forma de radiació és parcialment atenuada en el seu recorregut entre la flama i l'objecte receptor. Això es deu al fet que alguns dels components de l'atmosfera absorbeixen la radiació, especialment el vapor d'aigua i el  $\text{CO}_2$ . A la taula 6 es donen algunes correlacions per a l'estimació de la transmissivitat atmosfèrica.

TAULA 6. *Correlacions per a la determinació de l'emissivitat*

<i>Correlació</i>	<i>Observacions</i>	<i>Referència</i>
$\tau = 2,02(P_{wr} x)^{-0,09}$	[9] $10^4 < P_{wr} x < 10^5$	TNO, 1997
$\tau = 1 - 0,058 \ln(x)$	[10]	Satyanarayana <i>et al.</i> , 1991
$\tau = \log(14,1 R_H^{-0,108} x^{-0,13})$	[11] $T_f = 1.500 \text{ K}$ $x < 500 \text{ m}$	Satyanarayana <i>et al.</i> , 1991
$\tau = 1,389 - 0,135 \log(P_{wr} x)$	[12]	Cook <i>et al.</i> , 1990
$\tau = 1,304(R_H x)^{-1/16}$	[13]	Scandpower-Sinteg, 1992

### 3.1.2.4. *Factor de vista*

El factor de vista es defineix com la relació entre la radiació que rep l'objecte i la radiació total que emet la flama. És un paràmetre que depèn de la forma i la mida de la flama, així com de la

distància entre la flama i l'objecte i de la posició i l'orientació d'aquest. Avui dia, la manera més freqüent de calcular aquest paràmetre és mitjançant mètodes numèrics; no gensmenys, David i Bagster (1989 i 1990) han determinat els factors de vista per a diferents geometries de bassals i dolls de foc.

### 3.2. *Conseqüències derivades d'un incendi*

Tan bon punt es coneix l'efecte d'un incendi —és a dir, la radiació tèrmica—, es poden avaluar també les conseqüències que se'n poden derivar, és a dir, què passarà quan aquesta radiació arribi a les persones o l'entorn (edificis, equips, etc.). L'estimació de conseqüències es pot fer mitjançant dades tabulades (vegeu la taula 7) o mitjançant els denominats *models de vulnerabilitat*.

TAULA 7. *Conseqüències observades per a diversos valors de radiació tèrmica*

Radiació tèrmica (kW/m <sup>2</sup> )	Conseqüència
1,4	Inofensiu per a les persones sense cap protecció especial.
1,7	Mínim necessari per a provocar dolor.
2,1	Mínim necessari per a provocar dolor al cap d'1 min.
4,0	Suficient per a provocar dolor en 20 s; cremades de primer grau.
4,7	Provoca dolor en 15-20 s; ferides al cap de 30 s.
11,7	L'acer prim, parcialment aïllat, pot perdre la integritat mecànica.
12,5	La fusta es pot encendre després d'una exposició perllongada; fusió del recobriments plàstic en cables elèctrics; 100% de letalitat.
25,0	L'acer prim aïllat pot perdre la integritat mecànica.
37,5	Suficient per a produir danys en equips de procés i col·lapse d'estructures.

Els models de vulnerabilitat més utilitzats són els de l'anàlisi pròbit (*probability unit*), que relaciona la variable pròbit ( $Y$ ) amb la dosi de radiació rebuda ( $V$ ). La variable pròbit és una mesura del percentatge de població vulnerable sot-

mesa a una determinada dosi que rep un dany determinat. Les funcions pròbit solen tenir la forma següent:

$$Y = a + b \ln(V), \quad [9]$$

on  $a$  i  $b$  són constants que es determinen experimentalment a partir de la informació procedent d'accidents o, en determinats casos, a partir d'experimentació amb animals. La relació entre  $Y$  i el percentatge de població afectada es pot trobar a la bibliografia en forma de taula (Casal *et al.*, 1999). A la taula 8 es donen les funcions pròbit per estimar algunes de les conseqüències de la radiació tèrmica sobre les persones.

TAULA 8. Funcions pròbit per a la radiació tèrmica

Conseqüència	Funció pròbit*	
Cremades de primer grau	$Y = -39,83 + 3,0186 \ln(\dot{q}^{m^2/3} \cdot t)$	[14]
Cremades de segon grau	$Y = -43,14 + 3,0186 \ln(\dot{q}^{m^2/3} \cdot t)$	[15]
Mortalitat sense protecció	$Y = -36,38 + 2,56 \ln(\dot{q}^{m^2/3} \cdot t)$	[16]
Mortalitat amb protecció	$Y = -37,23 + 2,56 \ln(\dot{q}^{m^2/3} \cdot t)$	[17]

\*  $t$  en segons i  $\dot{q}''$  en  $W/m^2$ .

#### 4. NOMENCLATURA

$D$	diàmetre de la flama (m)
$\Delta H_c$	entalpia de combustió (kJ/kg)
$E$	poder emissiu de la flama ( $kW/m^2$ )
$E_{\max}$	poder emissiu màxim ( $kW/m^2$ )
$E_s$	poder emissiu del fum ( $kW/m^2$ )
$F$	factor de vista
$\dot{m}$	velocitat màssica de combustió (kg/s)
$M$	massa total de combustible involucrat en la bola de foc (kg)



$P_0$	pressió en el recipient abans que es produeixi l'esclat en una BLEVE (MPa)
$\dot{q}''$	flux de calor que incideix en un objecte receptor (kW/m <sup>2</sup> )
$Q_r$	energia emesa per la flama en forma de radiació per unitat de temps (kW)
$S_e$	paràmetre determinat experimentalment (m <sup>-1</sup> )
$T_a$	temperatura ambient (K)
$T_f$	temperatura de la flama (K)
$t_f$	temps que dura la bola de foc (s), a les equacions 14 a 18, temps d'exposició (s)
$V$	dosí d'un determinat efecte
$x$	distància entre la font emissora i l'objecte receptor (m)
$Y$	variable pròbit
$\varepsilon$	emissivitat de la flama
$\eta$	fracció de l'energia despresada en la combustió que s'emet en forma de radiació
$\sigma$	constant d'Stefan-Boltzmann
$\tau$	transmissivitat atmosfèrica

## BIBLIOGRAFIA

- CASAL, J.; MONTIEL, H.; PLANAS, E.; VÍLCHEZ, J. A. (1999). *Análisis del riesgo en instalaciones industriales*. Barcelona: Edicions UPC.
- COOK, J.; BAHRAMI, Z.; WHITEHOUSE, R. J. (1990). «A comprehensive program for calculation of flame radiation levels». *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 3, núm. 1, p. 150-155.
- DAVIS, B. C.; BAGSTER, D. F. (1990). «The computation of view factors of fire models. 2. Finite targets». *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 3, p. 327-329.

- (1989). «The computation of view factors of fire models. 1. Differential targets». *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 2, núm. 4, p. 224-234.
- MHIDAS (2003). Major Hazard Incident Data Service.
- MUÑOZ, M.; CASAL, J.; ARNALDOS, J.; PLANAS, E. (2003). «Modelling thermal radiation hazards, a review». A: *Chemical Industry and Environment IV*. Ed. A. Macías Machin i J. Umbría: Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- PLANAS, E. (1998). *Incendis d'hidrocarburs: Efectes sobre equips de procés*. Barcelona: Institut d'Estudis Catalans. Secció de Ciències i Tecnologia. (Arxius de les Seccions de Ciències; 118)
- ROBERTS, M. W. (2000). *Analysis of boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE): Events at DOE Sites*. Safety Analysis Workshop 2000.
- SATYANARAYANA, K.; BORAH, M.; RAO, P. G. (1991). «Prediction of thermal hazards from fireballs». *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 4, núm. 5, p. 344-347.
- SCANDPOWER-SINTEF (1992). *Handbook for fire calculations and fire risk assessment in the process industry*. Noruega: Scandpower.
- THE NETHERLANDS ORGANIZATIONS OF APPLIED SCIENTIFIC RESEARCH [TNO] (1997). BOSCH, C. J. H. van den; WETERINGS, R. [ed.]. *Methods for the calculation of physical effects due to releases of hazardous materials (liquids and gases)*. *Yellow Book*. 3a ed. La Haia: Committee for the Prevention of Disasters.