

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author

CONTRIBUCIÓ A L'ESTUDI DE LA PROTECCIÓ CONTRA INCENDIS EN INSTAL·LACIONS DE PROCÉS

Memòria de Tesi Doctoral presentada per
Eulàlia Planas Cuchi
per obtenir el grau de Doctor Enginyer Industrial

Barcelona, Setembre de 1996

Departament d'Enginyeria Química
Escola Tècnica Superior d'Enginyers Industrials de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya



T PLA

A en Lluís, en Josep, la Mercè, la Susi
la Carme, en Jordi i la Laura

AGRAÏMENTS

En primer lloc voldria agrair la col·laboració de l'empresa TRI,srl. (Tecsa Ricerca & Innovazione) i especialment de Tony Lancia i Leo Bordignon que van fer possible l'obtenció de les dades experimentals emprades en aquesta Tesi, sense les quals aquest treball no s'hauria pogut dur a terme. Novell oblidar però el Professor Norberto Piccinnini, que va posar-nos en contacte establint així les bases de la nostra col·laboració amb TRI.

Vull recordar aquí l'Stefano, en Giacomo, la Paola, en James, l'Andrea, la Loredana, l'Alessandro, la Sara i l'Ana; que van treballar també en l'obtenció de les dades experimentals però que sobretot foren uns grans companys durant la meva estada a Itàlia i els quals no oblidaré mai.

Vull donar les gràcies també a REPSOL EXPLORACIÓN per deixar que visités la plataforma petrolifera Casablanca, de Tarragona i en general per la seva bona disposició a col·laborar amb nosaltres.

M'agradaria agrair també a Jordi Sans i tots els companys de Protecció Civil de la Generalitat el fet d'haver-me introduït en el món de la seguretat industrial, amb ells vaig treballar gairebé dos anys i gràcies a això avui estic aquí.

Pel meu director de Tesi, Joaquim Casal, voldria tenir un agraïment molt especial ja que en els quatre anys que hem treballat junts m'ha animat constantment a fer coses i tirar endavant; d'ell he après molt, com a professional i com a persona.

Vull agrair també a en Josep Arnaldos els seus consells, el seu optimisme constant i la seva bona disposició en tot moment que em van ajudar molt en les hores baixes.

en Sergi Rodríguez, amb tots ells hem passat bons i mals moments però crec que el balanç ha estat molt positiu. Espero que això els animi a tirar endavant les seves Tesis. No oblidó tampoc en Jesús Navarro, que ha estat com un company més del CERTEC, ni l'Eduard Sanmartí que també ha estat company de carrera i que m'ha animat sovint.

Per a tots ells i molts d'altres que no puc citar aquí per no allargar-me, guardaré sempre un agraïment molt especial.

ÍNDEX

Índex

CAPÍTOL 1. INTRODUCCIÓ.....	1
1.1 Risc i accidents majors	2
1.2 Incendis.....	7
1.2.1 Incendi d'un líquid.....	7
1.2.2 Incendi d'un gas	12
1.2.3 Altres tipus d'incendi	15
1.2.4 Conceptes bàsics.....	17
1.3 Modelització d'incendis de bassals	33
1.3.1 Diàmetre del bassal	33
1.3.2 Geometria de l'incendi d'un bassal	35
1.3.3 Efectes tèrmics	38
1.4 Sistemes anti-incendi.....	43
1.4.1 Sistemes de protecció passiva	43
1.4.2 Sistemes de protecció activa	44
CAPÍTOL 2. ANTECEDENTS.....	55
2.1 Introducció	55
2.2 Experimentació sobre incendis de bassals	56
2.3 Velocitat de combustió	61
2.4 Calor emesa per les flames	65
2.5 Temperatura de la flama	66
2.6 Radiació incident sobre un objecte immers en les flames d'un bassal de foc.....	69

2.7 Evolució de les temperatures a la paret d'un dipòsit immers en les flames d'un bassal de foc	71
2.8 Anàlisi històrica d'accidents amb foc	73
2.8.1 Distribució en el temps dels accidents involucrant incendis.....	76
2.8.2 Distribució segons el tipus d'accident	78
2.8.3 Distribució segons l'origen de l'accident.....	80
2.8.4 Distribució segons la font d'ignició.....	82
2.8.5 Distribució segons la població afectada.....	84
2.8.6 Probabilitat acumulada de morts en accidents	87
CAPÍTOL 3. DESCRIPCIÓ DE LA INSTAL·LACIÓ EXPERIMENTAL.....	93
3.1 Introducció	93
3.2 Descripció del mòdul de proves	94
3.3 Combustibles utilitzats	95
3.4.1 Ruixadors i cabals de disseny.....	98
3.4.2 Tipus d'agents extintors utilitzats	103
3.5 Descripció del sistema de mesura i aparells utilitzats	105
3.5.1 Mesures de la temperatura.....	105
3.5.2 Altres mesures realitzades	107
3.6 Descripció de les proves realitzades	110
3.7 Resultats experimentals	113
CAPÍTOL 4. DESCRIPCIÓ I ANÀLISI DE RESULTATS	117
4.1 Introducció	117
4.2 Reproductibilitat de les proves i estat estacionari	118
4.3 Calor total i de convecció emesa durant l'incendi	123
4.3.1 Calor total	123

4.3.2 Efecte del dipòsit sobre la calor total alliberada en la combustió	131
4.4 Evolució de la temperatura a les parets del dipòsit.....	138
4.4.1 Evolució de les temperatures durant el primer minut	139
4.4.2 Evolució de les temperatures durant l'extinció de l'incendi.....	143
 CAPÍTOL 5. MODELITZACIÓ DE L'EVOLUCIÓ DE LES TEMPERATURES A LA PARET DEL DIPÒSIT SEGONS EL TEMPS, EN LA FASE PRÈVIA A L'EXTINCIÓ.....	 153
5.1 Introducció	153
5.2 Definició i modelització de la superfície de la flama en estat estacionari	154
5.3 Determinació de la radiació incident sobre un punt qualsevol de la superfície del dipòsit.....	158
5.3.1 Consideracions a tenir en compte	158
5.3.2 Pla tangent a un punt qualsevol de la superfície del dipòsit	161
5.3.3 Variació del flux de calor longitudinal ($\theta = 0$)	164
5.3.4 Variació del flux de calor circumferencial ($0 < \theta \leq 180^\circ$)	166
5.4 Resultats obtinguts amb el model per a l'estimació de la radiació que rep el dipòsit	173
5.5 Modelització de l'evolució de les temperatures a la paret del dipòsit segons el temps.....	177
5.5.2 Distàncies i àrees internodals. Volum dels nodes	182
5.5.3 Conductàncies	185
5.5.4 Resolució del sistema d'equacions	186
5.6 Resultats obtinguts amb el model que prediu les temperatures a la paret del dipòsit segons el temps	186
 CAPÍTOL 6. CONCLUSIONS.....	 195

NOMENCLATURA 199

BIBLIOGRAFIA 207

ANNEX I. INFORMACIÓ SOBRE LES PROVES DUTES A TERME
DURANT LA FASE EXPERIMENTAL I.1

ANNEX II. DETERMINACIÓ DE LA TEMPERATURA DE FLAMA

EN FUNCIÓ DEL TEMPS I L'ALÇADA	II.1
II.1 Bassal d'hexà de 4 m^2	II.2
II.2 Bassals de 12 m^2	II.6
II.3 Correcció de la temperatura de la flama	II.9

ANNEX III. RESOLUCIÓ NUMÈRICA DEL MODEL DE RADIACIÓ III.1

III.1 Determinació de la intersecció entre el contorn de la flama i el pla tangent a un punt de la superfície del dipòsit	III.1
III.2 Resolució del sistema d'equacions que permet determinar la temperatura a cada un dels nodes del dipòsit	III.4
III.3 Resolució numèrica de la integral tridimensional que permets determinar la radiació incident a cada un dels nodes	III.7

CAPÍTOL 1. INTRODUCCIÓ

CAPÍTOL 1. INTRODUCCIÓ

Algunes instal·lacions industrials es dissenyen i construeixen amb una distribució extremadament compacta; les plataformes d'extracció de petroli i determinades plantes de procés presenten una densitat d'equipament molt alta que, en cas de certs accidents, pot portar a situacions perilloses i pot complicar notablement la gestió dels procediments d'emergència. En aquestes instal·lacions sol haver-hi, a més, grans inventaris de materials perillosos, requerint-se sistemes de protecció d'alta fiabilitat i eficàcia.

Si es processen o emmagatzemem materials inflamables, cal instal·lar un bon sistema antiincendi. Aquest sistema hauria de ser capaç de cobrir dos objectius simultàniament: extingir o, almenys, controlar el foc i, a més a més, refrigerar les estructures i els equips de procés. Aquest segon objectiu és molt important, en alguns casos fins i tot més que el primer, ja que l'efecte del foc sobre determinats equips pot provocar la pèrdua de contenció de més material inflamable i, per tant, l'augment d'escala de l'accident.

Per a cobrir aquests dos objectius hi ha diverses possibilitats. En les instal·lacions convencionals, el refredament i l'extinció es duen a terme mitjançant sistemes independents, utilitzant-se de forma separada les característiques específiques de l'aigua i de l'escuma. L'aigua té unes propietats molt interessants i a més pot obtenir-se en grans quantitats a un cost relativament baix; en canvi, té alguns inconvenients —essent el principal d'ells la seva alta densitat— quan s'utilitza per a l'extinció d'incendis d'hidrocarburs. Si es vol cobrir la superfície incendiada d'un hidrocarbur, cal doncs recórrer a l'escuma; ara bé, aquesta és molt més cara que l'aigua i, per altra banda, sol estar disponible en quantitats molt més petites.

Un enfocament diferent i molt interessant consisteix en utilitzar un sol sistema de ruixat que descarregui solució d'escuma durant un temps determinat i a continuació continuï descarregant aigua. Aquest sistema hauria de descarregar un tipus d'escuma prou fluid per a comportar-se

com l'aigua des del punt de vista de refrigeració de l'equip, però suficientment estable per a poder tenir una acció de cobriment del bassal incendi. D'aquesta manera s'aconseguiria cobrir els dos objectius abans esmentats de forma simultània: mantenir refrigerat l'equip sotmès a l'acció directa del foc i alhora extingir o controlar l'incendi.

La refrigeració de l'equip sotmès de forma directa a l'acció de la flama requereix el coneixement de la intensitat d'aquesta acció, és a dir, exigeix la modelització de l'evolució del foc des del seu inici i de l'aportació calorífica a l'equip en qüestió. Això presenta una doble dificultat doncs, tot i que s'han publicat un gran nombre d'estudis sobre els incendis d'hidrocarburs, els aspectes esmentats han estat tractats per ben pocs autors, com es posa de manifest en el capítol següent. Pocs investigadors han dirigit la seva atenció a les primeres etapes de desenvolupament del foc (règim transitori) i pocs articles han estat publicats sobre el comportament de l'equipament sotmès al contacte directe de la flama.

L'objectiu d'aquesta tesi és l'estudi d'aquest tipus de sistemes: la modelització de la fase inicial de desenvolupament de l'equip sotmès a l'acció directa del foc, i l'estudi de l'eficàcia del procediment d'extinció esmentat.

En aquest capítol es fa una presentació general dels tipus principals d'incendis que es poden produir, així com dels conceptes i termes bàsics relacionats amb aquesta temàtica. Es fa també una introducció als models que s'utilitzen actualment en aquest camp i finalment es comenten els sistemes contraincendis que existeixen per a instal·lacions de procés.

1.1 Risc i accidents majors

La ràpida evolució tecnològica que ha experimentat la indústria en general i la indústria química en particular, el seu gran creixement i, per tant, l'increment dels inventaris de productes químics a les instal·lacions i als diversos mitjans de transport han provocat un augment de la probabilitat dels grans accidents amb notable impacte sobre persones, medi ambient i equipament.

Aquests riscos s'han fet ben palesos en els darrers anys. Els accidents de Sao Paulo, Ciutat de Mèxic i Bhopal, de greus conseqüències, van posar de manifest la necessitat de considerar la seguretat industrial com un tema de capital importància en aquelles activitats que podien representar un perill potencial per a la vida i el medi.

El concepte de risc s'associa a la probabilitat que un perill esdevingui un accident amb unes conseqüències determinades, és a dir:

$$\text{Risc} = \text{freqüència} \times \text{magnitud conseqüències}$$

Evidentment, quantificar el risc no resulta tan senzill com pot semblar donada la seva definició ja que calcular els paràmetres que intervenen en la mateixa no resulta pas fàcil.

Encara que hi ha diverses classificacions dels riscos, des del punt de vista de les activitats industrials es poden classificar en tres categories:

- Riscos convencionals: relacionats amb l'activitat i l'equip existents en qualsevol sector (electrocució, caigudes).
- Riscos específics: associats a la utilització de productes que, per la seva naturalesa, poden ocasionar danys (productes tòxics, radioactius).
- Riscos majors: relacionats amb accidents i situacions excepcionals. Les seves conseqüències poden presentar una especial gravetat, ja que la ràpida expulsió de productes perillosos o d'energia és capaç d'affectar àrees considerables (fuita de gasos, explosions).

D'aquests tres tipus de risc, els dos primers corresponen al tractament clàssic de la seguretat i higiene en el treball, i per la seva forma d'actuar són en general relativament fàcils de preveure.

En canvi, les especials característiques dels riscos majors els converteixen probablement en la contingència més temible.

Un accident és un esdeveniment fortuit i incontrolat, capaç de produir danys. En general, aquest esdeveniment coincideix en la indústria química amb situacions d'emissió, fuita, abocament, incendi i explosió, on hi ha implicades substàncies perilloses. Si la situació generada es pot classificar de risc greu, catàstrofe o calamitat pública —immediata o diferida— per a les persones, el medi ambient i els béns, s'anomena *accident major*.

La legislació vigent [BOE91] estableix tres tipus de categories per als accidents:

- *Categoría 1.* Aquells accidents en què es preveu que hi haurà, com a única conseqüència, danys materials en la instal·lació industrial accidentada. Els danys associats a l'emissió, la fuita, l'abocament i l'explosió queden limitats, per tant, als límits de la propietat de la instal·lació industrial; no es produeixen víctimes ni ferits.
- *Categoría 2.* Aquells accidents en què es preveu que hi haurà, com a conseqüència, possibles víctimes i danys materials a la instal·lació industrial. Les repercussions a l'exterior es limiten a danys lleus o efectes adversos sobre el medi ambient, en zones limitades.
- *Categoría 3.* Aquells accidents en què es preveu que hi haurà, com a conseqüència, possibles víctimes, danys materials o alteracions greus del medi ambient en zones extenses, a l'exterior de la instal·lació industrial.

Els accidents de les categories 2 i 3 són considerats accidents majors. En general, els accidents majors estan relacionats amb els tipus de fenòmens perillosos següents:

- De tipus tèrmic: radiació tèrmica.
- De tipus mecànic: ones de pressió i projecció de fragments.
- De tipus químic: emissió a l'atmosfera o abocament incontrolat de substàncies contaminants tòxiques o molt tòxiques.

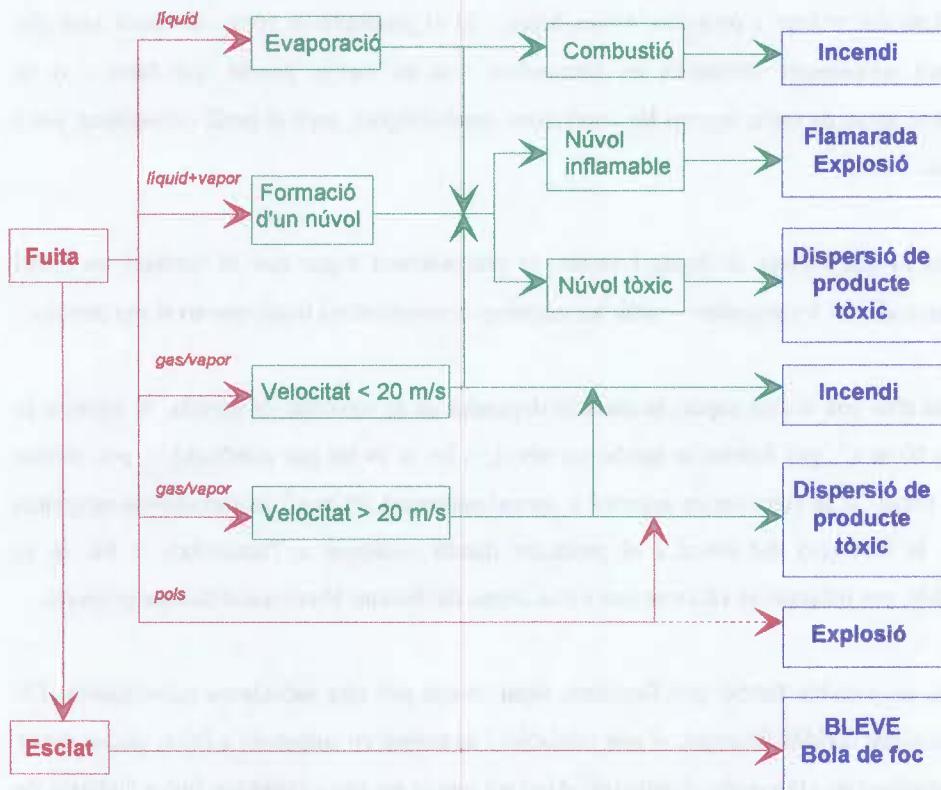


Figura. 1.1 Esquema simplificat dels diferents accidents que es poden produir en el cas d'una fuita accidental d'un producte tòxic o inflamable.

Els accidents de gran magnitud que es poden esdevenir en una indústria química són gairebé sempre associats a la fuita d'un producte tòxic o inflamable, generalment un fluid. A la figura 1.1 es mostra un diagrama simplificat de les diferents possibilitats que hi ha [CASA 96].

La fuita d'un fluid a l'atmosfera pot produir-se de diverses maneres: per trencament d'una conducció, per explosió d'un recipient, per sobreeiximent d'un dipòsit, etc. Segons la forma de sortida i les característiques del fluid, pot produir-se un incendi, un núvol tòxic o inflamable, etc. Si la fuita és de líquid es formarà una bassa —sempre dependent de la disposició del terreny— i hi haurà evaporació; si el producte és combustible, pot tenir lloc directament un incendi del líquid vessat, o bé pot formar-se un núvol que s'inflamarà en trobar un punt d'ignició, amb l'explosió consegüent. Aquesta originarà una ona de sobrepressió, que pot destruir les instal·lacions del voltant i provocar noves fuites. Si el producte és tòxic, el núvol que s'ha format pot simplement difondre's en l'atmosfera —si és menys pesant que l'aire— o bé desplaçar-se arran de terra, segons les condicions atmosfèriques, amb el perill consegüent per a la població.

Si la fuita és una barreja de líquid i vapor, és pràcticament segur que es formarà un núvol —excepte si el vent ho impedeix— amb les mateixes conseqüències finals que en el cas anterior.

En la fuita d'un gas o d'un vapor, la situació dependrà de la velocitat de sortida. Si aquesta és inferior a 20 m s^{-1} , pot formar-se també un núvol, o bé, si és un gas combustible, pot cremar com una torxa. Si la velocitat és superior a aproximadament 20 m s^{-1} , la turbulència originada impedeix la formació del núvol i el producte queda escampat a l'atmosfera, o bé, si és combustible, pot inflamar-se i formar una torxa capaç de destruir altres instal·lacions properes.

Finalment, és possible també que l'accident sigui causat per una substància pulverulenta. Els productes sòlids dividits finament, si són oxidables i es troben en suspensió a l'aire, poden donar lloc a explosions de gran poder destructor. Això sol passar no pas a l'exterior sinó a l'interior de determinats equips. En aquest cas, doncs, pot succeir l'accident sense que hi hagi hagut pròpiament una fuita.

1.2 Incendis

Dels diversos accidents que poden ocórrer en una indústria, l'incendi és el que, en termes generals, té un radi d'accio més reduït. Nogensmenys, els seus efectes poden ser temibles, ja que la radiació tèrmica pot afectar altres parts de la planta i generar altres accidents (explosions o fuites). 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). En el cas particular de les plataformes petrolíferes, l'incendi és l'accident més temut i alhora més greu que pot ocórrer; cal tenir en compte que la geometria d'aquestes instal·lacions és molt complexa i compacta [WHIG 94], en un espai de dimensions similars a un camp de futbol hi ha conjuntament l'àrea d'extracció de cru, l'àrea de processament dels hidrocarburs, l'àrea on resideixen tots els treballadors i a més un heliport.

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. En general la combinació més freqüent és l'explosió seguida de l'incendi, com va ocórrer en l'accident de Ciutat de Mèxic l'any 1984 (explosió i incendi d'un parc d'emmagatzematge de GLP, 450 morts) i a la plataforma Piper Alpha (1988), encara que també es pot produir el cas invers.

És evident l'interès que té la predicción 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 protegir els equips sotmesos a radiació. En definitiva, la modelització matemàtica d'un incendi permet la predicción dels possibles danys a persones i instal·lacions i l'establiment de les mesures que cal prendre per reduir aquests danys.

1.2.1 Incendi d'un líquid

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

d'evaporació assolirà un màxim degut a limitacions que aparèixen en la transferència de calor per radiació. 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 procediment d'evaporació varia segons els diferents tipus de combustibles:

- *Hidrocarburs líquids a temperatura ambient.* Poden evaporar-se per un dels següents mecanismes: la superfície del líquid bull i forma un vapor de composició semblant al líquid, o bé, es produeix una destil·lació en la qual bàsicament els components lleugers s'evaporaran i els pesants formaran un residu en fase líquida.
- *Combustibles criogènics.* Bulliran vigorosament fent que el bassal estigui ben barrejat i a temperatura uniforme i grans quantitats de combustible en fase vapor surtin del bassal.

El vapor que abandona el bassal és escalfat ràpidament per les flames. Alhora les flames arrosseguen l'aire de l'entorn i això crea grans turbulències on es barrejen 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. És precisament el sutge que dóna la coloració groga a aquests incendis; a més si escapa de la flama abans que sigui cremat completament es refreda emetent radiació, alhora forma una capa negra que absorbeix radiació just en els límits de la flama i que evita que la radiació emesa per les flames arribi a objectes propers a ella.

Bassals de foc sobre el mar

Aquest és un escenari molt similar al que s'ha vist en l'apartat anterior, amb la particularitat que el vessament de combustible es produeix sobre la superfície del mar. És un cas relativament freqüent al voltant de vaixells petroliers i plataformes petrolífères.

Un factor important a 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 bassal no sigui tan gran i l'evaporació sigui menor que en el cas anterior, fins el punt que sovint la flama no es pot mantenir més (la calor que es transfereix a l'aigua des del bassal és tan gran que la restant no pot evaporar el combustible). D'altra banda, si la ignició del bassal no es produeix de manera immediata el bassal anirà augmentant el seu diàmetre però alhora reduirà el seu gruix; pot arribar un moment en què el gruix sigui prou petit com per fer que la ignició esdevingui impossible (aquest gruix sol estar al voltant d'1.25 mm [SCAN 92]).

En el cas dels combustibles criogènics el comportament descrit varia considerablement, ja que la transferència de calor es produeix de l'aigua cap al bassal i no en sentit contrari podent arribar a igualar la calor transferida de la flama cap al bassal.

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

Un altre escenari accidental que es pot incloure dins aquest sub-apartat i del qual se'n troben molt poques referències són els bassals produïts en fuites submarines. Aquest tipus de fuites es produeixen en canonades submarines de transport de combustible. Normalment es considera que es forma una ploma cònica de combustible que ascendeix fins a la superfície; el diàmetre que adquireix en arribar a la superfície es fa dependre únicament de la profunditat a la qual es produeix la fuita. Malgrat tot, la interacció que es produeix entre el combustible i la superfície del mar pot arribar a alterar molt el diàmetre final que adquiereixi el bassal.

Incendis en moviment

Els incendis en moviment tenen lloc quan el líquid inflamable es vessa sobre una superfície inclinada (com pot ser, per exemple, la paret d'un dipòsit o un terreny en pendent). Si es produeix la ignició, l'incendi es desplaçarà cap allà on es desplaci el líquid. Aquests tipus d'incendi són molt perillosos ja que en pocs moments poden arribar a tenir grans dimensions i cobrir zones molt grans dins una planta.

Es pot dir que són semblants a un bassal de foc en el sentit que la flama es retroalimenta ella mateixa igual com s'ha vist en el cas dels bassals, però es desconeixen les seves característiques pel que fa a la geometria de la flama, velocitat de combustió, etc.

Boles de foc

Tot i que aquí s'engloben les boles de foc dins l'apartat d'incendis, estrictament parlant s'hauria de tractar el fenomen BLEVE/bola de foc com un accident amb entitat pròpia com poden ser els mateixos incendis, les explosions o les fuites tòxiques.

La paraula BLEVE, formada per les inicials de *boiling liquid expanding vapor explosion* (explosió del vapor en expansió d'un líquid bullent) s'empra per descriure un tipus d'explosió que, malauradament, és relativament freqüent en el món industrial. Aquest tipus d'explosions no tenen sempre un efecte tèrmic, però en la majoria de casos la substància involucrada és combustible i això fa que l'explosió sigui seguida per la formació d'una bola de foc, d'efectes molt greus [CASA 96].

Aquest fenomen es sol produir quan un recipient que conté un líquid a pressió és escalfat —per exemple per la radiació procedent d'un incendi— de manera que la pressió en el seu interior anirà augmentant. Arribarà un moment en el qual les parets no podran resistir la tensió elevada a què estan sotmeses i cediran. La despressurització sobtada del líquid —que es troava sobreescalfat, és a dir, a una temperatura a la qual no pot existir en estat líquid a la pressió

atmosfèrica— provocarà la vaporització brutal, per un fenomen d'ebullició nucleada en tota la seva massa, d'una part d'aquest, que serà abocat a l'exterior en forma de barreja bifàsica líquid/vapor. L'increment extraordinari de volum que experimenta el líquid en vaporitzar-se provocarà una ona de pressió (explosió, esclat del dipòsit).

Si la substància continguda en el recipient no és combustible, l'ona de sobrepressió i la projecció de fragments seran els únics efectes de l'explosió. Aquest serà el cas de l'explosió d'una caldera de vapor que conté, evidentment, aigua. En canvi, si la substància continguda en el recipient és combustible (per exemple, gas de petroli liquat com l'etilè o el propà), la massa de líquid i vapor vessada en el moment de l'explosió s'incendiarà, i donarà lloc a una foguera de forma aproximadament hemiesfèrica 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. Simultàniament, la radiació procedent de la combustió 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 forma turbulent, adquirint 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.

1.2.2 Incendi d'un gas

Quan es produeix la fuita d'un gas o un vapor inflamable es poden generar essencialment dos tipus d'incendi:

- Incendi d'un doll de gas (*Jet fire*)
- Incendi d'un núvol de gas (*Flash fire*)

Incendi d'un doll de gas

Aquest tipus d'incendi té lloc quan es produeix el vessament accidental de vapors o gasos inflamables amb un cert moment inicial. No sempre aquest tipus d'incendi és accidental, en el cas de les torxes de producció s'utilitzen per evacuar subproductes no volguts i en les torxes de procés per evacuar els gasos emesos a través de les 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 assolar, 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 assolar el gas en aquestes condicions és la sònica.

Un factor important que els distingeix dels incendis de bassals 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'aquesta sinó únicament de les característiques del vessament. Una altra diferència és que els dolls no tenen gens d'inèrcia i per tant el cabal de fuita inicial no té una importància determinant en el desenvolupament de l'incendi —tal com succeeix en els incendis de bassals—, el canvi en el cabal de vessament i la durada total de la fuita seran igualment importants.

Depenent del tipus de combustible que s'emet i de la velocitat amb què surti s'obtindran dolls de característiques diferents:

- En el cas de combustibles gasosos amb un moment inicial baix, el doll tindria unes característiques similars a les de les torxes de refineries (subsòniques) amb velocitats del gas dins la flama de l'ordre de 50 m s^{-1} . Aquest valor no és gaire més gran del que assoleixen els gasos en un bassal de dimensions grans [FL1 91]. No es pot doncs generalitzar el concepte de doll de gas com a flames de velocitats elevades. Aquest tipus de doll pot veure's fàcilment afectat per la presència de vent.

- Els dolls originats per la fuita de gasos liquats a pressió contenen, barrejades amb el gas, gotes de combustible encara líquid que es van evaporant (*flash*). Aquest tipus de doll també té característiques similars a les torxes, amb velocitats dels gasos relativament baixes. Pel fet de tractar-se de combustibles amb un pes molecular més elevat, però, produeixen flames més sutjoses i amb una càrrega radiant superior.
- Per últim, els dolls originats per la fuita de gasos a pressió acostumen a ser sònics (cas del gas natural). En aquest cas la flama, si és estable, comença a una certa distància de l'orifici de sortida del gas i sol ser blava a l'inici. Pel que fa a la velocitat dels gasos, si bé a la sortida de l'orifici pot ser de l'ordre de 300 m s^{-1} (correspondent a la velocitat del so del gas, en les condicions en què es troba el gas a la sortida), dins la flama les velocitats màximes que es poden arribar a assolir són de l'ordre de 100 m s^{-1} en la zona més propera a l'orifici. L'arrosegament d'aire cap a la flama és superior que en el cas dels dolls subsònics, per això la combustió és més eficient, la flama més curta, més calenta, amb menys sutje i per tant amb un poder radiant inferior.

Incendi d'un núvol de gas

Aquest tipus d'incendi té lloc quan es produeix el vessament d'un gas o un vapor inflamable, de manera que es forma un núvol que es va dispersant fins que troba una font d'ignició. La fuita pot ser instantània o contínua. L'origen d'un d'aquests núvols pot ser també el vessament d'un líquid que en condicions atmosfèriques experimenti un *flash* o que s'evapori molt ràpidament. És el cas del gas natural liquat i del gas liquat del petroli. Aquest fenomen es tracta com si fos una fuita contínua de vapor a l'atmosfera.

És difícil definir el punt de transició entre explosió i 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 confinament que pugui accelerar el front de flama, prop del punt d'ignició. La flama es mou des

del punt d'ignició cap a la font a través de les zones del núvol que es troben dins els límits d'inflamabilitat.

En el cas d'una fuita instantània, si la ignició es produeix de forma quasi immediata, el que es genera és una bola de foc (que ja s'ha descrit a l'apartat 1.2.1).

1.2.3 Altres tipus d'incendi

A més dels tipus bàsics d'incendis que s'han descrit en els dos apartats anteriors, hi ha alguns altres tipus d'incendi característics de les plantes de procés, encara que sovint no se'ls atribueix tanta importància. Dins d'aquest grup s'hi poden incloure els següents tipus d'incendi [LEES 86]:

- Incendis en bombes
- Incendis en brides
- Incendis en dipòsits d'emmagatzematge
- Incendis en aillaments

Incendis en bombes

Aquest tipus d'incendi es sol produir degut a la ignició de les fuites que s'originen en les juntes de les bombes, sobretot quan es treballa amb hidrocarburs a pressió. La font d'ignició sol ser la mateixa electricitat estàtica i les conseqüències d'aquest tipus d'incendi poden arribar a ser considerables.

Incendis en brides

Són els incendis que es produeixen degut a una fuita en una brida. Normalment el fet que la brida perdi és degut a que la canonada ha estat sotmesa a canvis de temperatura que li provoquen tensions i això fa que la brida cedeixi lleugerament deixant escapar part del producte que circula per la canonada.

Incendis en dipòsits d'emmagatzematge

Aquest tipus d'incendi és, malauradament, força corrent en plantes de procés, involucrant generalment grans quantitats de producte. En general els dipòsits de dimensions més grans solen ser els atmosfèrics de sostre fix o flotant. Els materials que s'hi emmagatzemen acostumen a ser inflamables. La causa més freqüent d'aquest tipus d'incendi és el sobre-ompliment del dipòsit, això pot fer esclatar la zona del vapor i fer que salti la tapa del dipòsit, aleshores l'incendi queda retingut dins el dipòsit sense que hi hagi dispersió del producte. D'altres vegades el producte sobreeixirà provocant un bassal el qual pot incendiar-se o evaporar-se i formar un núvol que en trobar una font d'ignició esclati. Les possibilitats són múltiples però els resultats acostumen a ser en qualsevol cas molt greus.

Incendis en aïllaments

En les plantes de procés, una gran quantitat d'equipament es troba protegit per un material aïllant. Aquest aïllament pot, per diversos motius, quedar impregnat amb olis i altres productes combustibles. Si l'aïllant estava calent, es pot produir un efecte d'auto-escalfament arribant a produir la ignició del combustible, provocant així el que s'anomena incendi en aïllaments. Generalment els combustibles que provoquen aquest tipus d'incendi són poc o gens volàtils i intrínsecament reactius; els aïllaments acostumen a tenir una conductivitat tèrmica molt petita i són porosos, fets que també afavoreixen l'auto-escalfament.

1.2.4 Conceptes bàsics

A continuació es defineixen els conceptes bàsics, tant de termodinàmica com de transferència de calor, que s'utilitzen al llarg d'aquesta tesi.

Temperatura d'inflamació

La temperatura d'inflamació, T_i , d'una substància és la temperatura mínima a la qual es produeix prou vapor com per formar, prop de la superfície del líquid, una mescla amb aire que es trobi dins els límits d'inflamabilitat. A la temperatura d'inflamació la mescla cremarà, però només breument, ja que no es genera prou vapor per mantenir la flama.

Temperatura d'autoignició

La temperatura d'autoignició, T_{au} , és aquella a la qual una substància inflamable pot cremar en aire sense necessitat d'una font d'ignició externa. La ignició es produeix espontàniament.

Velocitat de combustió

La velocitat de combustió es pot definir com la massa de combustible que es subministra a la flama per segon i per metre quadrat d'àrea del bassal, \dot{m}'' . Encara que aquesta és la manera més corrent d'expressar-la, hi ha també altres maneres de fer-ho: com una emissió de calor (kW) o com una disminució en el nivell de líquid (m/s).

Rendiment d'una combustió

S'anomena rendiment d'una combustió, η , al quotient entre la calor real alliberada durant la combustió i la calor que s'alliberaria en el cas que la combustió fos completa. Aquest paràmetre és sempre inferior a 1, ja que la combustió no és mai completa.

Limits d'inflamabilitat

Les barreges d'un combustible amb un oxidant només poden reaccionar si es troben dins un interval ben determinat de composició. Els límits d'aquest interval es coneixen amb el nom de límit inferior d'inflamabilitat (*LII*) i límit superior d'inflamabilitat (*LSI*), i s'expressen com a concentració de combustible en una determinada mescla oxidant/diluent i a una determinada pressió i temperatura. Fora d'aquests límits, la barreja és massa rica o massa pobra per què es pugui produir la combustió sense una aportació externa d'energia.

Energia d'ignició

L'energia d'ignició és l'energia que es necessita per encendre una barreja inflamable. Aquesta energia depèn del producte inflamable, la concentració, la pressió i la temperatura.

Temperatura adiabàtica de flama

Si es considera un sistema on hi ha una mescla de vapor inflamable i aire, i se suposa que és adiabàtic (per tant no hi ha transferència de calor des de o cap al sistema), aleshores es pot calcular el que s'anomena temperatura adiabàtica de flama mitjançant la següent expressió:

$$\Delta H_c = c_p \left(T_{f_{ad}} - T_a \right) \quad (1.1)$$

Evidentment aquesta temperatura serà molt més elevada que la que es pugui observar en un incendi real, ja que aquest mai és adiabàtic: hi ha pèrdues de calor per radiació i, més, a temperatures molt elevades els productes de reacció es dissocien i absorbeixen una part de l'energia.

Temperatura de flama

Normalment, per conveni, es sol considerar T_f com la temperatura d'una flama ideal, isotòpica, isoterma i òpticament gruixuda per a qualsevol longitud d'ona. Alguns autors [HESK84] atribueixen a aquesta temperatura valors al voltant de 1250 K. Malgrat això, la realitat és que les flames presenten temperatures molt variables tan en l'espai com en el temps. La temperatura de les partícules de cendra pot diferir molt del gas que les envolta i a més l'aire que es va incorporant a la combustió fa que hi hagi un cert gradient de temperatura en alçada.

Calor de combustió

La calor de combustió d'un compost (ΔH_c) es defineix com la quantitat de calor emesa quan una unitat d'aquest compost s'oxida completament per donar un producte final estable. Com que les reaccions d'oxidació són exotèrmiques, ΔH_c per conveni és negativa. Per als càlculs d'incendis cal utilitzar la calor neta de combustió, que correspon a la calor de combustió quan l'aigua s'emet en forma de vapor.

Radiació tèrmica

Totes les substàncies emeten contínuament radiació electromagnètica degut a l'agitació molecular i atòmica associada a l'energia interna del material. Si la substància està en equilibri, aquesta energia interna és proporcional a la temperatura de la substància [SIEG92]. L'energia radiant emesa pot anar des de les ones de radio amb longituds d'ona de centenars de metres fins els rajos còsmics, amb longituds d'ona inferiors a 10^{-4} m. Quan es parla de radiació tèrmica es fa referència a la radiació que es pot detectar en forma de calor o llum, amb longituds d'ona entre 1000 i 0.4 μm aproximadament.

Intensitat de radiació

Es defineix la intensitat de radiació monocromàtica o espectral com la potència que passa pel punt \vec{r} a través de la unitat d'àrea projectada per unitat d'angle sòlid al voltant de la direcció $\vec{\Omega}$ i per unitat de longitud d'ona respecte la longitud d'ona λ [BONA94].

$$I_\lambda(\vec{r}, \vec{\Omega}, t) = \left[\frac{de_\lambda}{dA \cos \theta d\Omega d\lambda dt} \right]_{\lim dA, d\Omega, d\lambda \rightarrow 0} \quad (1.2)$$

I_λ Intensitat de la radiació espectral.

de_λ energia radiant a l'interval de longitud d'ona $\lambda + d\lambda$ que es propaga a través de l'angle sòlid $d\Omega$ de direcció $\vec{\Omega}$.

$dA \cos \theta$ Àrea projectada de dA en la direcció $\vec{\Omega}$.

\vec{n} Vector unitari normal a la superfície.

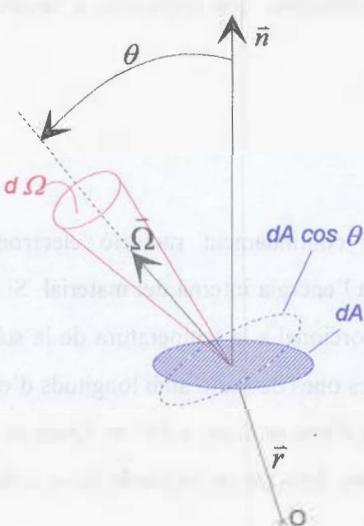


Figura 1.2 Emissió de radiació d'una superfície dA .

Considerant només l'estat transitori, aleshores $I_\lambda = I_\lambda(\vec{r}, \vec{\Omega})$; de la definició d'intensitat en resulta:

$$\frac{de_\lambda}{dAdt} = I_\lambda(\vec{r}, \vec{\Omega}) \cos \theta \, d\Omega \, d\lambda \quad (1.3)$$

Integrant aquesta igualtat s'obté la potència radiant per unitat d'àrea cap al punt \vec{r} o des d'aquest. Si el rang de longituds d'ona és de 0 a ∞ , s'obté la potència total. Quan l'angle sòlid considerat és tot el semiespai, la potència rep el nom d'hemisfèrica.

Poder emissiu total i hemisfèric

S'anomena poder emissiu total i hemisfèric E a tota la radiació tèrmica emesa per un element de superfície cap a un semiespai per unitat de temps i per unitat de superfície. El poder emissiu espectral E_λ és el poder emissiu considerant la radiació entre les freqüències λ i $\lambda + d\lambda$. D'acord amb les definicions anteriors:

$$E(\vec{r}) = \int_{\lambda=0}^{\infty} \left[\int_{\Omega=0}^{2\pi} I_\lambda(\vec{r}, \vec{\Omega})_{\text{emesa}} \cos \theta \, d\Omega \right] d\lambda \quad (1.4)$$

Si la intensitat emesa és independent de la direcció, aleshores es diu que la superfície emet de manera difusa (normalment és així) i es compleix que:

$$\begin{aligned} E_\lambda(\vec{r}) &= \pi I_\lambda(\vec{r}) \\ E(\vec{r}) &= \pi I(\vec{r}) \end{aligned} \quad (1.5)$$

Cos negre

Es defineix un cos negre com un cos ideal que permet que tota la radiació que incideix a la seva superfície penetri en ell (no hi ha reflexió) i que internament absorbeix tota l'energia que hi ha penetrat (no hi ha transmissió), verificant-se això per a totes les longituds d'ona i tots els angles d'incidència de la radiació. La radiació emesa per un cos negre a una certa temperatura és la

radiació màxima possible que qualsevol cos a la mateixa temperatura pot emetre, per això es diu que es tracta d'un emissor i un absorbidor perfecte.

El concepte de cos negre és molt important en l'estudi de la transferència de calor per radiació ja que serveix de patró amb el qual es comparen els cossos reals.

La intensitat de la radiació espectral per a un cos negre vé donada per la *Llei de distribució de Planck*:

$$I_{b\lambda} = I_{b\lambda}(T) = \frac{2hc_0^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{hc_0}{\lambda kT}\right) - 1 \right]} \quad (1.6)$$

h Constant de Planck ($= 6.6256 \cdot 10^{-34}$ J·s)

k Constant de Boltzmann ($= 1.38054 \cdot 10^{-23}$ J·K)

c_0 Velocitat de la llum al buit ($= 2.9979 \cdot 10^8$ m·s $^{-1}$)

T Temperatura (K)

λ Longitud d'ona (μm)

Com que $I_{b\lambda}(T)$ no depèn de la direcció (emissor difús), el poder emissiu espectral d'un cos negre és:

$$E_{b\lambda}(T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (1.7)$$

$$c_1 = 2\pi h c_0^2 = 3.743 \cdot 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2}$$

$$c_2 = hc_0/k = 1.4387 \cdot 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

El poder emissiu total d'un cos negre s'obté integrant el poder emissiu espectral en tota la gamma de longituds d'ona i vé donat per la *Llei d'Stefan-Boltzmann*:

$$E_b(T) = \sigma T^4 \quad (1.8)$$

σ Constant d'Stefan-Boltzmann ($= 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)

La funció de distribució de Planck presenta un màxim per a cada temperatura. Aquest màxim ve donat per la *Llei de desplaçament de Wien*:

$$\lambda_{max} = \frac{2897.6}{T} \quad (1.9)$$

Absorbància-Absortivitat

L'absorbància α es defineix com la fracció d'energia incident en un cos real que és absorbida per aquest. Experimentalment resulta més fàcil mesurar l'emิตància que l'absorbància, per això sovint s'utilitzen relacions entre les dues de manera que coneixent-ne una l'altra es pot deduir sense necessitat de realitzar cap mesura.

Quan es faci referència a una superfície perfecta s'utilitzarà el terme absortivitat.

Reflectància-reflectivitat

La reflectància ρ es defineix com la fracció d'energia incident en un cos real que és reflectida per aquest. Les característiques reflectives d'una superfície són més difícils d'especificar que l'absorbància o emitància. Això és degut a que l'energia reflectida depèn de la naturalesa i de la pureza de la superfície, de la seva temperatura, de la freqüència de la radiació incident, del seu estat, etc.

Quan es fa referència a una superfície perfecte es parla de reflectivitat en lloc de reflectància.

Transmitància-transmissivitat

La transmitància τ es defineix com la fracció d'energia incident en un cos real que és transmessa per aquest. En general, el flux de potència radiant G que incideix sobre la superficie d'un medi material es distribueix en tres parts, l'absorbida αG , la reflectida ρG i la transmessa τG ; ha de complir-se per tant que $\alpha + \rho + \tau = 1$. Per a un sistema opac, $\tau = 0$ i $\alpha + \rho = 1$.

El terme transmissivitat es fa servir únicament per a les superfícies perfectes.

Emitància-emissivitat

L'emิตància, ε , és un paràmetre que indica com emet la radiació un cos real si es compara amb un cos negre, és a dir que correspon al quotient entre el poder emissiu del cos real a la temperatura absoluta T i el poder emissiu del cos negre a la mateixa temperatura. Així, l'emิตància total hemisfèrica seria:

$$\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)} < 1 \quad (1.10)$$

L'emิตància depèn de la temperatura del cos, de la longitud d'ona de l'energia emesa i de l'angle d'emissió. Normalment es mesura experimentalment per la direcció normal a la superficie i en funció de la longitud d'ona. De tota manera quan es calcula l'energia total emesa per un cos, cal conèixer l'emissivitat total que inclogui totes les direccions i longituds d'ona.

Segons les *Lleis de Kirchoff* per a un sistema situat en una cavitat isotèrmica l'absorbància i l'emitància totals i espectrals són iguals. Experimentalment s'ha comprovat que això es verifica encara que el cos no es trobi en una cavitat isotèrmica.

$$\varepsilon(T) = \alpha(T) \quad (1.11)$$

Cos gris

Es defineix un cos gris com aquell en el qual l'emitància i l'absorbància espectrals no depenen de la longitud d'ona. Igual que en els cossos negres es considera també que l'emissivitat i absorbivitat direccionals no depenen de la direcció (és a dir, es tracta de superfícies difuses), encara que aquests dos paràmetres poden dependre de la temperatura. Així, per a cada temperatura de la superfície, la radiació emesa és una fracció determinada de la que emetria el cos si fos negre, per a totes les longituds d'ona.

Factor de visió

Es defineix el factor de visió difusa F_{ij} com la fracció de la potència radiant que abandona difusament la superfície i i que incideix directament (sense reflexió) en la superfície j . Així, el factor de visió entre dues superfícies diferencials seria (vegeu la figura 1.3):

$$dF_{dA_1-dA_2} = \frac{dq_{dA_1-dA_2}}{q_{dA_1-\text{Semiespai}}} = \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2 dA_2}{\pi r^2} \quad (1.12)$$

$q_{dA_1-dA_2}$ potència radiant que abandona dA_1 i incideix directament en dA_2 .

$q_{dA_1-\text{Semiespai}}$ potència radiant que abandona dA_1 cap a tot el semiespai.

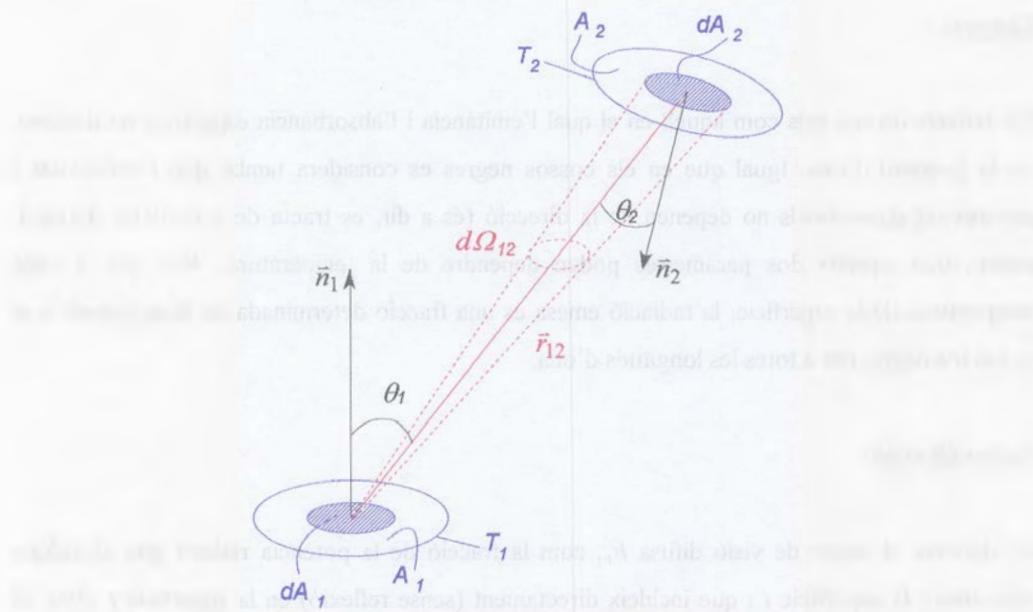


Figura 1.3 Bescanvi d'energia radiant entre dues superfícies diferencials difuses.

Radiació en medis participants

Fins ara els conceptes que s'han tractat referents a la radiació consideraven que el medi a través del qual es transmetia la radiació no interactuava amb aquest fenomen, és a dir el medi era no participant. En la majoria de casos reals però, el medi a través del qual passa la radiació pot també absorbir, emetre o dispersar la radiació. En aquest cas resoldre el problema de transferència d'energia radiant requereix conèixer la temperatura, la intensitat de radiació i les propietats físiques arreu del medi. Alguns dels conceptes que es donen a continuació ajuden a tractar el cas dels medis participants [SIEG 92].

Coeficient d'extinció (K)

Quan la radiació travessa un determinat medi, aquest pot absorbir i dispersar part d'aquesta energia. S'ha trobat que la variació en la intensitat de la radiació és proporcional al valor local de la intensitat. El coeficient de proporcionalitat és el que s'anomena coeficient d'extinció i és

una propietat física del medi. És funció de la temperatura, la pressió, la composició del medi i la longitud d'ona de la radiació incident.

$$dI_\lambda = -K_\lambda(S)I_\lambda dS \quad (1.13)$$

Integrant aquesta expressió per un camí de llargada finita S , es pot veure que la intensitat de radiació queda atenuada exponencialment mentre passa per un medi participant:

$$I_\lambda(S) = I_\lambda(0) \exp\left[-\int_0^S K_\lambda(S)dS\right] \quad (1.14)$$

El coeficient d'extinció es compona de dues parts, el *coeficient d'absorció* (α_λ) i el *coeficient de dispersió* ($\sigma_{s\lambda}$), tots ells s'expressen en m^{-1} .

$$K_\lambda(\lambda, T, P) = \alpha_\lambda(\lambda, T, P) + \sigma_{s\lambda}(\lambda, T, P) \quad (1.15)$$

En molts casos els efectes de la dispersió no es tenen en compte i aleshores $K_\lambda = \alpha_\lambda$.

En un medi on només hi hagi absorció i emissió, $K_\lambda = \alpha_\lambda$ i la intensitat espectral al llarg d'un camí S serà atenuada per l'absorció i augmentada per l'emissió donant:

$$I_\lambda(S) = I_\lambda(0) \exp(-K_\lambda S) + I_{b\lambda}\left[1 - \exp(-K_\lambda S)\right] \quad (1.16)$$

D'aquí se'n pot deduir que l'absorbància i l'emิตància (emissivitat) totals d'un medi de composició i temperatura uniformes siguin:

$$\alpha(S) = \frac{\int_0^\infty I_\lambda(\lambda, 0)\left[1 - \exp(-K_\lambda(\lambda)S)\right]d\lambda}{\int_0^\infty I_\lambda(\lambda, 0)d\lambda} \quad (1.17)$$

$$\varepsilon(S) = \frac{\pi}{\sigma T^4} \int_0^\infty I_{b\lambda}(\lambda) [1 - \exp(-K_\lambda(\lambda)S)] d\lambda \quad (1.18)$$

Pel que fa a la transmitància, es determina:

$$\tau(S) = 1 - \alpha(S) \quad (1.19)$$

Distància mitjana de penetració de la radiació

La distància mitjana de penetració de la radiació, l_m , s'obté multiplicant la fracció absorbida entre S i $S+ds$ per la distància S i integrant per tots els camins des de S fins a ∞ :

$$l_m = \int_{S=0}^{\infty} SK_\lambda(S) \exp\left[-\int_0^S K_\lambda(S) dS\right] dS \quad (1.20)$$

Quan el coeficient d'extinció no varia en tot el recorregut de S , aleshores:

$$l_m = \frac{1}{K_\lambda} \quad (1.21)$$

El concepte de distància mitjana de penetració de la radiació permet avaluar si un determinat medi és molt o poc opac a la radiació que passa a través seu.

Gruix òptic o opacitat

S'anomena gruix òptic, $k_\lambda(S)$, al factor exponencial de l'equació (1.20). El gruix òptic o opacitat és una mesura de la capacitat que té un determinat medi per atenuar la radiació d'una determinada longitud d'ona.

$$k_\lambda \equiv \int_0^S K_\lambda(S) dS \quad (1.22)$$

Quan el coeficient d'extinció és constant el gruix òptic només dependrà d'aquest i de la llargada del camí recorregut:

$$k_\lambda(S) = K_\lambda S \quad (1.23)$$

o el que és el mateix: $k_\lambda(S) = \frac{S}{l_m}$

Quan $k_\lambda \gg l$ es diu que el medi és *òpticament gruixut*, és a dir que la distància mitjana de penetració de la radiació és molt més petita que la dimensió característica del medi. Quan $k_\lambda \ll l$ es diu que el medi és *òpticament prim*, és a dir que la distància mitjana de penetració de la radiació és força més gran que la dimensió característica del medi, en aquest cas la radiació passarà a través del medi sense que hi hagi una atenuació significativa d'aquesta.

Poder emissiu de la flama

El poder emissiu d'una flama és la calor emesa per radiació cap a l'exterior, per unitat d'àrea de la flama. Aquesta definició és però bastant simplista i sovint porta a confusions ja que la radiació no s'emet des d'una "superficie" sino que prové dels productes calents de la combustió, del vapor combustible i de les partícules de cendra incandescents. Generalment les confusions provenen del fet que hi ha diverses maneres de definir la superficie associada a un determinat poder emissiu:

1. Poder emissiu puntual: correspon al poder emissiu mesurat mitjançant un radiòmetre telescopic o d'angle estret. El valor obtingut correspon a una petita porció de la flama.

2. Poder emissiu promitjat: correspon al poder emissiu mesurat mitjançant un radiòmetre d'angle ample, el qual rep radiació de tota la flama. El problema del valor així obtingut rau en coneixer la forma de la flama que s'ha utilitzat per a calcular-lo.

3. Modelització del poder emissiu promitjat: correspon al poder emissiu calculat mitjançant models que utilitzen formes de flama senzilles i que s'empren per a calcular la transferència de calor per radiació cap a objectes externs a la flama. El valor obtingut d'aquesta manera sol ser inferior als altres dos ja que els models de superfície de flama tenen àrees superiors a la flama visible real.

Més endavant (apartat 1.3) es mostren alguns dels models utilitzats per a estimar el poder emissiu de la flama.

Transmissivitat atmosfèrica

La transmissivitat atmosfèrica es pot definir com la fracció d'energia emesa per la flama, que no és absorbida o dispersada per l'atmosfera. A l'atmosfera la radiació és absorbida majoritàriament pel diòxid de carboni i el vapor d'aigua. El contingut de l'atmosfera en CO₂ és aproximadament constant, al voltant de 330 ppm en volum, en canvi el contingut en aigua varia molt en funció de la temperatura i la humitat.

En els càlculs per a la modelització dels efectes d'un incendi hi intervé la transmissivitat atmosfèrica. Aquest paràmetre es sol calcular en funció de l'absorbància de l'aigua i el diòxid de carboni els quals, a la vegada, es determinen utilitzant els gràfics editats per Hottel i Sarofim [HOTT67] i seguint el següent procediment:

$$\tau = 1 - \alpha_w - \alpha_c \quad (1.24)$$

τ Transmissivitat atmosfèrica

α_w Absorbància del vapor d'aigua

α_c Absorbància del diòxid de carboni

On les absorbàncies del diòxid de carboni i del vapor d'aigua es determinen a partir de les equacions següents:

$$\begin{aligned}\alpha_w &= \varepsilon_w \left(\frac{T_a}{T_s} \right)^{0.45} \\ \alpha_c &= \varepsilon_c \left(\frac{T_a}{T_s} \right)^{0.65}\end{aligned}\quad (1.25)$$

ε_w Emissivitat del vapor d'aigua

ε_c Emissivitat del diòxid de carboni

T_a Temperatura ambient (K)

T_s Temperatura de la font de la radiació (K)

Els gràfics publicats per Hottel i Sarofim dónen les emissivitats del diòxid de carboni i el vapor d'aigua en funció de la temperatura de la font i del paràmetre $p_w L$ ($p_c L$, en el cas del diòxid de carboni), que és la pressió parcial del vapor d'aigua (o del diòxid de carboni segons el cas) multiplicada per la llargada del camí que ha de recórrer la radiació. En el cas del diòxid de carboni la pressió parcial es manté aproximadament constant al voltant de $3 \cdot 10^{-4}$ atm. En el cas del vapor d'aigua la pressió parcial s'ha de calcular a partir de la humitat relativa i la temperatura ambient:

$$p'_w = \frac{RH}{100} \exp\left(14.4114 - \frac{5328}{T_a}\right) \quad (1.26)$$

$$p_w L = p'_w L \left(\frac{T_s}{T_a} \right) \quad (1.27)$$

RH Humitat relativa (%)

T_a Temperatura ambient (K)

T_s Temperatura de la superfície emissora (K)

L Distància que ha de recórrer la radiació (m)

Liquid inflamable

S'enten per líquid inflamable aquell que té una temperatura d'inflamació inferior a 37.8 °C i que la seva pressió de vapor (absoluta) no supera els 2.8 bar a 37.8 °C.

Liquid combustible

S'enten per líquid combustible aquell que té una temperatura d'inflamació igual o superior a 37.8 °C.

Densitat d'aigua

Unitat d'aplicació d'aigua a una àrea o superfície, expressada en litres per minut i per metre quadrat.

Bec polvoritzador

Dispositiu que produeix aigua polvoritzada, amb unes dimensions de gota, velocitat i densitat determinades.

Equip de detecció automàtica

Equip per detectar la calor, la flama, el fum, els gasos inflamables o altres condicions que es produeixen degudes a un foc, i accionar automàticament els equips d'alarma i protecció.

1.3 Modelització d'incendis de bassals

A continuació es fa una breu revisió crítica dels models que s'utilitzen normalment per a predir els efectes d'incendis de bassals, això inclou tant els models per a la determinació de la geometria de la flama com aquells utilitzats en la determinació de la radiació que aquesta emet. No s'inclouen aquí els models específics d'altres tipus d'incendi (com els dolls de foc) ja que no s'han tractat en la modelització i per tant no tenen un interès especial dins aquesta tesi.

D'altra banda, tots els models que s'exposen en aquest apartat han estat validats repetidament i, tot i que no sempre són aplicables a qualsevol tipus d'incendi de bassal, estan plenament acceptats en el seu interval d'aplicació i es poden trobar en qualsevol bibliografia bàsica sobre incendis [SCAN 92].

Com es veurà la majoria de models són molt senzills, això fa que siguin àmpliament utilitzats; cal dir però que la senzillesa s'aconsegueix també a base de simplificar extremadament el problema fent suposicions que sovint impliquen un error important. Evidentment quan els resultats derivats dels models s'empren per a càlculs d'enginyeria aquest error esdevé normalment irrellevant.

1.3.1 Diàmetre del bassal

En molts dels models que es proposen més endavant cal conèixer el diàmetre de l'incendi. En el cas que el líquid combustible hagi quedat retingut en una cubeta, aquest diàmetre serà directament el de la cubeta o, en el cas que la cubeta sigui rectangular, el diàmetre equivalent d'una cubeta circular amb una àrea igual a la de la cubeta rectangular.

En els casos en què no hi hagi mur de contenció caldrà distingir prèviament si la fuita és instantània o és contínua; això es pot fer mitjançant l'expressió següent:

$$\tau_{cr} = \frac{t_s \dot{y}}{V_L^{1/3}} \quad (1.28)$$

- τ_{cr} Temps crític (---)
 t_s Durada de la fuita (s)
 \dot{y} Quantitat total de combustible vessat (m^3)
 V_L Velocitat de combustió (m s^{-1})

Si $\tau_{cr} < 2 \cdot 10^{-3}$, es considera que la fuita és instantània; altrament es considera contínua.

Fuita instantània

En el cas que la fuita sigui instantània, el diàmetre en funció del temps es pot determinar de la manera següent:

$$D_e = D_m \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{t}{t_m} \left(1 + \left(\frac{2}{\sqrt{3}} - 1 \right) \left(\frac{t}{t_m} \right)^2 \right) \right]^{1/2} \quad (1.29)$$

- t Temps (s)
 D_m Diàmetre màxim que pot assolir el bassal (m)
 t_m Temps necessari per arribar al diàmetre màxim (s)

on D_m es pot calcular mitjançant:

$$D_m = 2 \left(\frac{V_L^3 g}{\dot{y}^2} \right)^{1/8} \quad (1.30)$$

- g Acceleració de la gravetat (m s^{-2})

i t_m :

$$t_m = 0.5743 \left(\frac{V_L}{g\dot{y}^2} \right)^{1/4} \quad (1.31)$$

Com que el diàmetre màxim només es manté durant un temps molt petit, utilitzar-lo pot comportar una sobreestimació considerable dels resultats, per això sovint s'utilitza el diàmetre mitjà en el temps:

$$D_a \approx 0.683 D_m \quad (1.32)$$

Fuita contínua

Per al cas de fuita contínua, les expressions següents permeten calcular el diàmetre d'equilibri, D_{eq} :

$$D_{eq} = 2 \left(\frac{V_L}{\pi g \dot{y}} \right)^{1/2} \quad (1.33)$$

$$t_{eq} = 0.564 \frac{D_{eq}}{\left(g \dot{y} D_{eq} \right)^{1/3}} \quad (1.34)$$

essent t_{eq} el temps necessari per arribar al diàmetre d'equilibri.

1.3.2 Geometria de l'incendi d'un bassal

Tot i que hi ha diversos models que permeten determinar la radiació emesa per l'incendi d'un bassal, el que més sovint s'utilitza i més desenvolupat està és el que s'anomena model de flama sòlida. Com es veurà en el següent apartat, en aquest model se suposa que la flama és un sòlid amb una forma ben definida, que es pot aproximar a un cilindre i que, a més, es comporta com un emissor gris.

Així, per a poder descriure l'incendi com un cilindre caldrà determinar-ne el diàmetre, l'alçada i, en el cas que hi hagi presència de vent, també la inclinació i el desplaçament (vegeu figura 1.4).

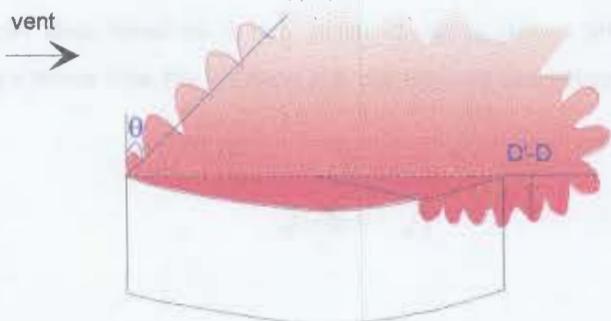


Figura 1.4 Esquema que mostra la inclinació i el desplaçament que experimenta la flama en presència de vent.

Ja s'ha vist, a l'apartat 1.3.1, com determinar el diàmetre de la flama, que depenia sobretot del tipus de vessament, del lloc on es produïa el vessament i de la velocitat de combustió. A continuació es dónen algunes expressions que permeten determinar l'alçada, la inclinació i el desplaçament de la flama.

Alçada de la flama

Per a l'alçada de la flama l'expressió més coneguda és la de Thomas [THOM63]; encara que n'hi ha moltes altres, aquesta és molt general i s'adapta força bé a tot tipus d'incendi:

$$\frac{L}{D} = 42 \left[\frac{\dot{m}''}{\rho_a \sqrt{gD}} \right]^{0.61} \quad (1.35)$$

g Acceleració de la gravetat (m s^{-2})

ρ_a Densitat de l'aire ambient (kg m^{-3})

L Alçada de la flama (m)

D Diàmetre del bassal (m)

\dot{m}'' Velocitat màssica de combustió ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

En cas que hi hagi presència de vent, aleshores l'alçada variarà. Segons el mateix autor, la nova alçada en aquestes condicions serà:

$$\frac{L}{D} = 55 \left[\frac{\dot{m}''}{\rho_a \sqrt{gD}} \right]^{0.67} u^{*-0.21} \quad (1.36)$$

On u^* és la velocitat adimensional del vent:

$$u^* = \frac{u_w}{\left(\frac{g \dot{m}'' D}{\rho_v} \right)^{1/3}} \quad (1.37)$$

u_w Velocitat del vent (m s^{-1})

ρ_v Densitat del vapor combustible (kg m^{-3})

Inclinació i desplaçament de la flama

En presència de vent la flama s'inclina i també es pot desplaçar per la base, fent que augmenti lleugerament el diàmetre. Les equacions que representen més bé aquest fenomen són les donades per l'AGA (American Gas Association):

$$\begin{aligned} \cos \theta &= 1 && \text{per } u^* \leq I \\ \cos \theta &= \frac{I}{\sqrt{u^*}} && \text{per } u^* \geq I \end{aligned} \quad (1.38)$$

θ Angle d'inclinació de la flama (rad)

Pel que fa al desplaçament de la flama, Lautkaski [LAUT92] proposa l'equació següent, on D' és el nou diàmetre de la base, comprenent el desplaçament:

$$\frac{D'}{D} = 1.5 \left(\frac{u_w^2}{gD} \right)^{0.069} \quad (1.39)$$

L'efecte del vent no és gaire important pel que fa a la radiació a una certa distància. En canvi, pot ser extremadament gran a distàncies curtes si el desplaçament de la base de l'incendi origina contacte directe de la flama amb un altre equip (per exemple, un dipòsit). En aquestes circumstàncies, el flux calorífic que rep aquest equip és molt superior i la situació pot agreujar-se considerablement.

1.3.3 Efectes tèrmics

L'efecte tèrmic de l'incendi d'un bassal és degut a la radiació. Quan es parla de radiació tèrmica cal tenir en compte tant l'emissor d'aquesta radiació com l'objecte o els objectes que s'hi troben exposats. Així, per a modelitzar la radiació emesa per l'incendi els dos models clàssics són el *model de cos sólid* i el *model de font puntual*, que es descriuràn a continuació. D'altra banda, quan un es fixa en quin serà el receptor, cal distingir dos casos clarament diferenciats: quan l'objecte d'interès es troba a una certa distància de l'incendi o bé quan s'hi troba immers. Segons el cas, el mecanisme de transferència de calor varia i, per tant, aquests dos casos s'han de tractar de manera diferent. Tant el model del cos sólid com el de font puntual estan pensats per a determinar la radiació incident en objectes a una certa distància de la flama però no per aquells que hi són immersos.

Model de font puntual

Aquest model es basa en les següents suposicions:

1. La flama es pot representar com una font molt petita (punt) d'energia tèrmica.
2. L'energia emesa en forma de radiació és una fracció determinada de l'energia total emesa durant la combustió.

3. La intensitat de la radiació varia proporcionalment a l'invers de la distància al quadrat.

Segons aquest model el flux radiant que arriba a un objecte a una distància x de la flama és doncs:

$$Q = \frac{E}{4\pi x^2} \quad (1.40)$$

On E és el poder emissiu de la flama expressat en W , que es determina:

$$E = \dot{m}f\Delta H_c \quad (1.41)$$

\dot{m} Velocitat màssica de combustió ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)

ΔH_c Calor de combustió ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$)

f correspon a la fracció de l'energia de combustió que és alliberada en forma de radiació. Aquest paràmetre és totalment empíric i es pot trobar tabulat per alguns casos. El punt que farà de font es pot col·locar tant al centre geomètric de la flama, que es pot trobar coneixent la seva alçada i inclinació, com al centre del bassal. El punt escollit pot afectar les prediccions si la flama és molt alta o molt inclinada. Un altre factor a tenir en compte és que l'equació que s'ha donat correspon a la màxima radiació que pot assolir un objecte a una distància x sense tenir en compte l'absorció atmosfèrica; cal tenir present però que a vegades el factor f pot dur incorporat aquest efecte, dependent de com s'hagi determinat.

Aquest model és aplicable, només, per a distàncies 5 vegades superiors al diàmetre del bassal.

Model del cos sòlid

En aquest model la font de radiació es considera com un cos amb una determinada geometria (en el cas dels incendis de bassals aquesta geometria sol considerar-se cilíndrica), que emet

radiació uniformement en tota la seva superfície. El flux de calor incident sobre un objecte a una distància x de la flama es calcula mitjançant l'equació següent:

$$Q = \tau F E_m \quad (1.42)$$

En aquest cas F correspon al factor de vista. Com ja s'ha descrit a l'apartat 1.2.4 el factor de vista quantifica la relació entre la superfície emissora i receptora indicant si tot l'objecte, o només una part d'ell és vist per la flama. τ fa referència a la transmissivitat atmosfèrica, que també s'ha descrit a l'apartat 1.2.4. Per últim, E_m és el poder emissiu promitjat de la superfície de la flama; a l'apartat 1.2.4 s'ha descrit breument però aquí es detallaran alguns dels models que s'utilitzen per a predir aquest paràmetre quan s'utilitza el model del cos sòlid.

Normalment el poder emissiu d'una flama turbulent es calcula suposant que aquesta es comporta com un cos gris, així:

$$E = E_b \varepsilon \quad (1.43)$$

On suposant que es coneix, o es pot estimar, la temperatura de la flama T_f , segons la llei de Planck el poder emissiu d'un cos negre es pot determinar a partir de la següent expressió:

$$E_b = \sigma (T_f^4 - T_a^4) \quad (1.44)$$

Com ja s'ha vist a l'apartat 1.2.4, l'emissivitat d'un medi homogeni al llarg d'un determinat camí S es pot determinar mitjançant l'expressió:

$$\varepsilon(S) = \frac{1}{\sigma T_f^4} \int_0^\infty E_b(\lambda) [1 - \exp(-K_\lambda S)] d\lambda \quad (1.45)$$

Si la mescla es considera grisa aleshores el coeficient d'extinció serà constant per a totes les longituds d'ona i per tant:

$$\varepsilon = 1 - \exp(-KS) \quad (1.46)$$

A la bibliografia [ATAL71] es poden trobar alguns valors dels coeficients d'extinció per a diferents combustibles.

El model del cos sòlid en principi és més acurat que el model de font puntual, sobretot per a distàncies properes a la flama; evidentment dependrà també dels models que s'utilitzin per a determinar els paràmetres que intervenen en l'equació i també de la forma de la flama que s'hagi escollit.

Model per a objectes immersos en la flama

Cap dels dos models descrits anteriorment és aplicable en els casos en què la flama incideix directament sobre l'objecte considerat. En el cas d'objectes immersos en les flames, a més de la transferència de calor per radiació, també hi ha una part de la calor que es transfereix per convecció.

Calcular la transferència de calor dins una flama és molt difícil, sobretot pel fet que cal conèixer la temperatura, velocitat i composició de la flama en tot moment i mentre aquesta està reaccionant. D'altra banda el fet que hi hagi un objecte dins la flama pot alterar tots aquests paràmetres.

En el cas dels combustibles que generen molt de fum i cendra l'efecte de la radiació és molt superior a la convecció perquè la velocitat del flux gasós és inferior als 10 m/s. Així la majoria d'autors que han treballat en aquest tema consideren únicament la radiació per a poder simplificar el problema i rares vegades validen els seus resultats amb dades experimentals.

No es pot dir doncs que hi hagi, actualment, cap model apte per a calcular la transferència de calor en objectes immersos en flames i l'únic de què es disposa és de dades experimentals d'alguns autors que han treballat sobre aquest tema (en el capítol 2 d'aquesta tesi es fa una revisió més extensa dels diferents treballs experimentals que s'han realitzat).

Altres models

A més dels models ja descrits, tots ells semi-empírics, hi ha dos tipus més de models:

- Models diferencials
- Models integrals

Els models diferencials són matemàticament molt complexos, es basen en la resolució numèrica de les equacions de Navier-Stokes en la seva forma diferencial. Aquests models requereixen altres sub-models que descriguin els processos químics i físics que tenen lloc dins la flama. En principi aquests models representen una manera molt rigorosa de resoldre el problema, en general però, són encara eines de recerca no aplicables a la realitat. Tot i que poden predir bastant bé el moviment de l'aire i el fum, presenten llacunes importants pel que fa a la forma i posició de la flama, a la radiació externa i a la transferència de calor interna. D'altra banda rarament es validen amb dades a escala real i aquest és un element fonamental a l'hora de decidir l'aplicabilitat o no d'un model teòric.

Pel que fa als models integrals, es pot dir que són un compromís entre els models semi-empírics i els models diferencials. Si bé també es basen en la resolució matemàtica de les mateixes equacions i poden incorporar també sub-models que descriguin la turbulència, la combustió o la transferència de calor, aquestes equacions estan expressades en la seva forma integral i només es considera com a variable independent la coordenada al llarg de l'eix de la flama. Això fa que la resolució del problema es simplifiqui notablement. A la bibliografia només s'ha pogut trobar

referència de dos models que podrien ser aplicables a gran escala encara que no han estat validats, són els models de Wilcox [WILC75] i de Vachon i Champion [VACH86].

1.4 Sistemes anti-incendi

En general, les mesures de prevenció i protecció contra incendis es poden classificar dins dels dos sistemes següents:

1. Sistemes de protecció passiva
2. Sistemes de protecció activa

Els sistemes de protecció passiva estan constituïts per una sèrie de mesures que normalment vénen definides amb el mateix disseny de la planta i que tenen funcions de prevenció i protecció per tal d'evitar que un possible incendi pugui propagar-se per tota la instal·lació. Els sistemes de protecció activa els constitueixen tots aquells mecanismes pensats específicament per a la detecció i la lluita contra el foc. La diferència essencial entre els dos sistemes és que la protecció passiva no cal activar-la, encara que no hi hagi foc té les mateixes funcions, mentre que la protecció activa hi és però no actua fins que no s'activa com a resposta a un incendi.

1.4.1 Sistemes de protecció passiva

Els sistemes anti-incendi de protecció passiva són barreres o aïllants que protegeixen les estructures reduint la velocitat d'increment de temperatura d'aquestes. Aquests sistemes no requereixen energia per a dur a terme la seva acció, aquesta va únicament associada a les característiques tèrmiques del material utilitzat (conductivitat tèrmica, capacitat calorífica, etc.), el qual es disposa al voltant de l'objecte a protegir.

El material utilitzat per a fer l'aïllament ha de ser capaç de mantenir l'estructura a protegir per sota d'una determinada temperatura (normalment 540 °C) durant un període de temps pre-

establert (1 hora o 1 ½ h) quan aquesta es troba sotmesa de manera contínua a temperatures al voltant de 980 °C. Els materials més utilitzats són el formigó i el ciment vermiculita tot i que n'hi ha molts d'altres. No s'han de confondre amb els aïllaments que es posen per evitar les pèrdues de calor ja que aquests poden tenir propietats de protecció contra el foc però també poden no tenir-les.

També formarien part dels sistemes de protecció passiva totes aquelles mesures destinades al transvasament del material cap a zones més segures. És el cas de les vàlvules de venteig en dipòsits a pressió o de les bombes en els dipòsits atmosfèrics, que en cas d'incendi permeten transportar els productes emmagatzemats cap a altres zones de la planta més segures.

Per últim cal tenir en compte que un disseny adequat de la instal.lació pot constituir un bon element de protecció passiva, mentre que un mal disseny i distribució pot agravar les conseqüències del mateix incendi.

1.4.2 Sistemes de protecció activa

Els sistemes de protecció activa són sistemes integrats de detecció i activació automàtica de mecanismes per combatre les flames, el fum i les càrregues tèrmiques. En el *Reglamento de instalaciones de protección contra incendios* [BOE 93] (Real Decreto 1942/1993 del 5 de Novembre, Ministeri d'Industria i Energia) es distingeixen els següents sistemes de protecció activa:

- Extintors d'incendis
- Sistemes d'hidrants
- Sistemes de boques d'incendi equipades
- Sistemes fixos d'extinció amb aigua polvoritzada

- Sistemes fixos d'extinció amb ruixadors d'aigua.
- Sistemes fixos d'extinció amb escuma física de baixa expansió
- Sistemes fixos d'extinció amb pols
- Sistemes fixos d'extinció amb ruixadors i/o polvoritzadors d'aigua/escuma

Extintors d'incendis

Un extintor és un aparell que conté un agent extintor que pot ser projectat i dirigit sobre un foc per l'acció d'una pressió interna. Els extintors portàtils estan concebuts per a ser portats i utilitzats a mà, de manera que en condicions de funcionament han de tenir una massa inferior o igual a 20 kg.

Els extintors es classifiquen segons l'agent extintor que contenen, així es distingeixen:

- Extintors a base d'aigua
- Extintors d'escuma
- Extintors de pols
- Extintors d'anhidrid carbònic
- Extintors d'hidrocarburs halogenats

Sistemes d'hidrants

Els hidrants són uns aparells hidràulics, connectats a una xarxa de subministrament, destinats a proporcionar aigua en totes les fases de l'incendi. N'hi ha de tres tipus:

- de columna seca
- de columna humida
- soterrats

Els hidrants de columna seca tenen forma de columna que emergeix del sòl que està connectada a la xarxa general de distribució i que disposa d'uns ràcords de connexió. L'aigua entra a la columna només quan s'obre la vàlvula principal, situada sota el sòl.

En el cas de l'hidrant de columna humida, el sistema és molt semblant a l'anterior però amb la diferència que l'aigua està ocupant sempre l'interior de l'hidrant.

Per últim, els hidrants soterrats són bàsicament com els anteriors però es troven situats sota terra, en una arqueta amb tapa i cércol de ferro colat.

Boques d'incendi equipades

Estan constituïdes pel conjunt d'elements necessaris per transportar i projectar aigua des d'un punt fix de la xarxa de subministrament d'aigua, fins el lloc de l'incendi. Això inclou una debanadora giratòria d'alimentació axial, una vàlvula de secció, una longitud unitària de mànega semirígida, una llança-boquilla i opcionalment un armari de protecció del conjunt.

Sistemes fixos d'aigua polvoritzada

El sistema més extès de protecció activa en àrees de procés són els polvoritzadors fixos d'aigua. Actualment aquests sistemes s'han de dissenyar, construir i instal·lar d'accord amb normativa de la *National Fire Protection Association NFPA15 i NFPA13* [NFPA15] [NFPA13] o en el cas de les plataformes petrolíferes s'utilitzen també normatives específiques com la SI 611 (1978) [SI611/78].

Aquests sistemes estan formats per una sèrie de polvoritzadors suspesos del sostre, de manera que l'aigua aplicada cobreixi tota l'àrea de procés a protegir. Additionalment es poden disposar altres polvoritzadors al voltant d'equipaments específics de grans dimensions.

Normalment els becs dels polvoritzadors utilitzats tenen un orifici de dimensions entre 6 i 10 mm, podent abocar cabals entre 30 i 100 l/min. La pressió al bec és de l'ordre de 1.4÷2.8 bar. En sortir, l'aigua forma un con de gotes molt fines (al voltant de 400 μm de diàmetre) amb un angle d'obertura que pot anar des de 90° fins a 120°, això fa que el diàmetre de cobertura sigui d'uns 2÷2.3 m. Aquest diàmetre, força petit, juntament amb el fet que aquests cons són poc estables obliga normalment a col·locar un gran nombre de polvoritzadors encara que l'àrea a protegir sigui relativament petita.

En el cas de les plataformes petrolíferes es poden trobar sistemes que tinguin de l'ordre de 300 polvoritzadors, capaços de subministrar cabals de fins a 15000 l/min. Evidentment, aquests sistemes requereixen uns càlculs hidràulics molt sofisticats, cal tenir en compte que les canonades de distribució de l'aigua van disminuint progressivament de diàmetre fins arribar al polvoritzador.

Aquests sistemes s'utilitzen normalment per la protecció d'equips i instal·lacions de procés, recipients de gasos i líquids inflamables, canonades i altres equips com motors, transformadors, etc. El seu ús pot ser independent o complementari amb altres sistemes o equips de protecció contra el foc.

L'aigua polvoritzada s'utilitza per a la protecció contra els següents riscos:

- Materials inflamables, líquids o gasosos
- Transformadors, interruptors d'oli i motors
- Combustibles ordinaris com paper, fusta i productes tèxtils
- Sòlids que no reaccionin perillósament amb l'aigua

En general, l'aigua polvoritzada pot utilitzar-se per qualsevol de les següents finalitats:

- Extinció de l'incendi
- Control de l'incendi
- Protecció contra la radiació
- Prevenció de l'incendi

Amb aquests sistemes l'extinció s'aconsegueix per refredament, sofocació pel vapor produït, emulsificació d'alguns líquids, dissolució, etc.

L'activació del sistema es duu a terme mitjançant un equip automàtic de detecció instal·lat en l'àrea a protegir (encara que hi ha casos en què es situa fora d'aquesta àrea).

Els cabals de disseny soLEN ser de com a mínim $12.2 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, segons la SI 611 o, segons NFPA15 de $10.2 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$. En les àrees considerades de risc més elevat, aquests cabals poden augmentar fins a $20 \div 24 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$. Això tant es pot fer des del mateix sistema descrit com col·locant polvoritzadors addicionals al voltant de dipòsits, etc. En aquest cas els polvoritzadors

es col·loquen a una distància de 0.6 m i espaiats cada 2÷2.5 m, amb cabals entre 10 i 15 l·min⁻¹·m⁻².

Quan l'incendi és degut a productes inflamables amb una temperatura d'inflamació inferior a la temperatura de l'aigua utilitzada (normalment líquids inflamables amb punts d'inflamació inferiors a 60 °C), aquest sistema no permet l'extinció total de l'incendi sinó únicament el seu control. En aquests casos hauran de funcionar amb una densitat de com a mínim 20 l·min⁻¹·m⁻² durant el temps necessari per tal que:

- Es consumeixi tot el material
- Es pugui aturar la fuita
- S'arregli l'avaria que ha provocat l'incendi

Pel que fa al sistema de detecció, haurà de ser capaç d'activar el sistema de protecció dins dels 20 segons en què s'espera es desenvolupi l'incendi.

Sistemes fixos de ruixadors d'aigua

Aquests sistemes es dissenyen i projecten per detectar i extingir un incendi en els seus inicis o per evitar la seva propagació dins uns límits preestablerts quan aquest ja s'hagi desenvolupat [UNE 23-590].

Aquests sistemes es solen utilitzar per protegir locals i objectes identificats per una activitat general, encara que a vegades s'apliquen amb finalitats més concretes com la refrigeració.

Bàsicament hi ha dos tipus de ruixadors, els de tipus *obert*, utilitzats sobretot en els sistemes de diluvi, i els de tipus *tancat*, anomenats també ruixadors automàtics, utilitzats en la resta de sistemes.

Hi ha quatre tipus de sistemes de ruixadors [SFPE92]:

1. *Sistemes de canonada humida*; són amb tota probabilitat els més utilitzats. Consisteixen en una xarxa de canonades que contenen aigua a pressió. Els ruixadors estan connectats a les canonades de manera que cada un d'ells protegeix una determinada àrea. Quan un d'aquests ruixadors rep calor s'activa, deixant que l'aigua cobreixi l'àrea a protegir.
2. *Sistemes de canonada seca*; són molt semblants als anteriors, però les canonades es mantenen seques gràcies a una vàlvula especial col·locada a l'entrada de la xarxa. La vàlvula es manté tancada gràcies a què les canonades s'omplen d'aire o nitrogen a pressió, quan el ruixador s'activa surt l'aire fent que la pressió dins la canonada disminueixi i la vàlvula s'obi deixant pas a l'aigua. Aquests sistemes s'acostumen a utilitzar en aquelles àrees on l'aigua de les canonades podria gelar-se.
3. *Sistemes de diluvi*; aquest tipus de sistemes no utilitzen ruixadors automàtics sinó ruixadors de bec obert. Una vàlvula manté l'aigua a l'entrada de la xarxa, aquesta vàlvula s'activa mitjançant un sistema de detecció a part. Quan la vàlvula és activada, l'aigua entra a la xarxa i surt simultàniament per tots els ruixadors. Aquests sistemes s'utilitzen en el cas d'incendis que es puguin propagar amb molta rapidesa.
4. *Sistemes d'actuació avançada*; són semblants als sistemes de diluvi però utilitzen ruixadors automàtics. Dins les canonades hi ha aire a pressió i la vàlvula d'entrada d'aire s'activa també a través d'un sistema de detecció a part. Un cop l'aigua entra a les canonades, quedarà aturada al ruixador, que al ser automàtic només s'activarà quan rebi calor. En aquest cas l'aigua no té perquè sortir simultàniament per tots els ruixadors, dependrà d'aquells que s'activin per efecte de la calor generada per les flames.

Sistemes fixos d'extinció amb escuma de baixa expansió

Aquests sistemes es poden aplicar a l'emmagatzematge i manipulació de combustibles líquids calents i de líquids inflamables i combustibles amb una temperatura d'inflamació inferior a 60 °C [UNE 23-521]. La forma d'aplicació pot ser tant en forma de doll com polvoritzada.

Una aplicació típica dels sistemes fixos d'extinció amb escuma són les àrees d'emmagatzematge, les zones exposades a grans vessaments, els equips de procés, sales de bombes, dipòsits oberts, instal·lacions d'extracció per dissolvents, plantes de destil·lació i refineries.

Un sistema d'escuma consta d'un subministre d'aigua i escuma, un dosificador, un generador d'escuma i un sistema de distribució, juntament amb els dispositius que descarreguen l'escuma en forma polvoritzada o de doll. El funcionament del sistema pot ser manual o automàtic.

L'escuma subministrada pels polvoritzadors ha de formar ràpidament una capa consistent al voltant dels obstacles a protegir.

Sistemes fixos d'extinció amb pols

Aquests sistemes són aplicables a incendis que requereixen una ràpida eliminació de la flama [UNE 23-541]. Així, són adequats per a la protecció de focs de líquids inflamables o combustibles durant la seva càrrega o descàrrega, combustibles ordinaris (fusta, paper, teixit, etc.), focs d'elements que estiguin sotmesos a tensió elèctrica, etc.

Un sistema d'extinció amb pols està format per una sèrie de dispositius en els que la pols química és transportada mitjançant gas a pressió a través d'un sistema de canonades i es descarrega mitjançant becs o mànegues. Aquests sistemes poden ser manuals o automàtics.

Sistemes fixos de ruixadors aigua/escuma

Aquests sistemes es basen en l'ús d'uns tipus específics de ruixadors i polvoritzadors dissenyats especialment per a poder suministrar escuma o aigua segons convingui. No s'han de confondre amb els sistemes descrits anteriorment ja que utilitzen dispositius diferents i estan sotmesos a una legislació específica [NFPA-16].

Els sistemes de ruixadors d'aigua/escuma consten d'un conjunt de canonades connectades a una font de concentrat d'escuma i a una font de subministrament d'aigua. Quan s'activa el sistema de detecció, s'obre la vàlvula de subministrament d'aigua i aquesta entra al sistema, el concentrat d'escuma és injectat a l'aigua i la solució resultant surt a l'exterior a través del ruixador que genera i distribueix l'escuma. Quan s'acaba el concentrat d'escuma, l'aigua continua sortint fins que s'atura manualment.

La seqüència amb què es descarrega l'agent extintor és variable, tant pot ser aigua/escuma/aigua com escuma/aigua o viceversa.

Pel que fa als sistemes de polvoritzadors d'aigua/escuma són molt semblants als anteriors però els becs de descàrrega de l'agent extintor són del tipus polvoritzador en lloc de ruixador (al capítol 3 es descriuen amb més detall les diferències entre un ruixador i un polvoritzador).

En ambdós casos els becs de sortida són del tipus "aspirant d'aire", només en el cas que s'utilitzin escumes del tipus AFFF (*aqueous film forming foam*) es poden fer servir ruixadors estàndard.

Aquests sistemes són aplicables especialment per a la protecció en incendis de líquids inflamables. No són aconsellables en focs deguts a gasos liquats o comprimits o en materials que reaccionin violentament amb aigua. Per líquids solubles en aigua cal utilitzar escumes específiques del tipus alcohol.

CAPÍTOL 2. ANTECEDENTS

STRUCTURE & METHODS

CAPÍTOL 2. ANTECEDENTS

2.1 Introducció

Dins aquest capítol es vol donar una visió concreta de la situació en què es troba actualment la investigació en el camp dels incendis, centrada sobretot en aquells aspectes que es desenvolupen posteriorment en aquesta tesi. Evidentment cal tenir present que tot el que s'exposa aquí fa referència a investigacions que han estat publicades, i això no sempre representa la globalitat; una part molt important —quantitativa i qualitativament parlant— dels treballs d'investigació es duen a terme dins les empreses i no s'arriben a fer mai públics i això els fa pràcticament inaccessibles.

En primer lloc s'analitzen els treballs de caire experimental, sobretot de mitjana i gran escala. Posteriorment es revisen aquells treballs teòrics o semiempírics que estudien aspectes o conceptes també tractats en aquesta tesi; per últim es fa un repàs a la situació en què es troba la modelització dins aquest camp.

Atès que aquesta tesi es centra fonamentalment en incendis de bassals, tots els treballs que es citen aquí fan referència a aquest tipus d'incendi, exceptuant algun cas en què, per alguna aportació específica interessant, s'hagi pogut citar treballs referents a algun altre tipus d'incendi.

El final d'aquest capítol s'ha dedicat a la realització d'una anàlisi històrica mitjançant la base de dades d'accidents MHIDAS que ajuda a comprendre la importància del fenomen a través del seu origen, les seves causes i la magnitud de les seves conseqüències. L'anàlisi s'ha dut a terme sobre un total de 6099 accidents i permet corroborar la importància dels incendis dins la globalitat dels accidents que tenen lloc tant en la indústria de procés com en el transport de mercaderies perilloses.

2.2 Experimentació sobre incendis de bassals

Fent un repàs a la bibliografia publicada en els darrers 15 anys es pot comprovar que el nombre de treballs experimentals referents a incendis de bassals és relativament petit (de l'ordre d'uns 20), especialment si es té en compte la importància del fenomen que s'està tractant.

Aquests treballs abarquen un ventall molt ampli de situacions, tant pel que fa a tipus de combustibles, dimensions del bassal, mesures realitzades, disseny, resultats, etc. Això fa, alhora, que el nombre de treballs dels quals se'n pugui extreure resultats interessants —en el context d'aquesta tesi— es redueixi encara més; com a contrapunt, aquest fet fa que la tasca realitzada aquí cobri més significat i importància.

Els treballs més interessants, pel que fa a aquesta tesi, són aquells en què s'estudia el comportament de dipòsits sotmesos a l'acció directa de les flames. L'any 1988 Moodie [MOOD88] publicà un treball on apareix un resum dels experiments duts a terme entre 1964 i 1986 (vegeu la taula 2.1), encara segons el mateix autor es podien trobar referències des de 1925. Més tard, en un article publicat per Leslie i Birk [LESL91], apareixen noves referències a treballs experimentals duts a terme entre 1973 i 1988.

En els experiments fets per Bray una sèrie de termoparells mesuraven la temperatura a la paret del dipòsit —a dins i a fora— tant a la zona de vapor com a la de líquid i també la temperatura del líquid (en aquest cas l'aigua) contingut en el dipòsit. El combustible, querosè, no cremava en un bassal sinó en un cremador. L'objectiu d'aquests experiments era la determinació dels cabals d'aigua necessaris per a evitar que la paret del dipòsit assolis temperatures excessives.

De tots els experiments, el realitzat a una escala més gran és el descrit per Anderson que involucrava un dipòsit de transport per ferrocarril de 64 tones immers totalment en un incendi de JP-4. En aquest experiment s'enregistraven les temperatures de la paret del dipòsit en diversos punts a dins i a fora del mateix, les temperatures del líquid i del vapor, el flux de calor provinent de la flama i la temperatura d'aquesta, el nivell del líquid i la pressió dins el dipòsit.

L'experiment durà uns 24.5 minuts, fins la destrucció del dipòsit. Segons aquest autor com més altes són les temperatures a les que està sotmès el dipòsit, menor és la pressió necessària perquè es produueixi la ruptura del dipòsit. D'altra banda, aquesta s'inicia en la direcció axial. També es dugueren a terme algunes proves més amb el mateix dipòsit a escala 1/5.

Taula 2.1 Experiments realitzats entre 1964 i 1986 d'incendis que involucren dipòsits [MOOD,88], [LESL,91].

Núm.	Autor	Data	Dimensions del dipòsit	Contingut	Entorn
1	G.A.Bray	1964	5 tn	aigua	exterior
2	AAR-RPI	1973	escala 1/5	propà	exterior
3	C.Anderson AAR-RPI	1974	64 tn	propà	exterior
4	R.D.Appleyard Transports del Canadà	1980	escala 1/5	propà	exterior
5	Cutler i Williams HSE/Shell	1980/81	1/4 tn	aigua propà	exterior
6	Cutler i Moodie HSE/Shell	1981/82	1/4 tn 1 tn	aigua propà	exterior
7	B.Droste	1983	2 ½ tn	propà	---
8	Fauske DIERS	1983	laboratori	---	---
9	J.E.S.Venart	1983/86	40 l laboratori	freons	interior
10	K.Billinge / HSE	1985	1/4 tn	propà	exterior
11	Davis engineering	1985	escala 1/5 0.5 m ³	aigua	interior
12	T.Nylund	1985	diàmetre=3 m	Gasos	exterior
13	Moodie Cowley HSE/Shell/BGC	1985/86	5 tn	propà	exterior

En els experiments descrits per Appleyard es dugueren a terme 6 proves amb un dipòsit a escala 1/5 ple al 85% amb propà, s'utilitzava també JP-4 com a combustible i les mesures realitzades eren: pressió interna, temperatures de la paret del dipòsit i nivell del líquid. Aquí el que es valorava era la diferència observada entre les quatre proves realitzades amb els dipòsits protegits amb un aïllament (*Explosafe*) i les dues que es van fer amb el dipòsit no protegit. Els resultats obtinguts mostraren que els dipòsits protegits amb *Explosafe* van resistir l'incendi encara que en algun cas el dipòsit es deformà. Els dipòsits sense aïllament van cedir al cap de 8 minuts aproximadament.

En els experiments duts a terme per l'HSE (*Health and Safety Executive, UK*) una sèrie de dipòsits de fins a 5 tn es sotmeteren a bassals de querosè [MOODI 88] [BEYN 88] [ROBE 82]. En tots els casos es mesuraven les temperatures a diversos punts de la paret del dipòsit, la temperatura del líquid i del vapor contingut en el dipòsit així com la pressió interna. Els dipòsits d'1/4 tn s'utilitzaren també per assajar l'efectivitat de diferents tipus de materials aïllants així com de sistemes de polvorització d'aigua. En les proves fetes amb el dipòsit de 5 tn s'enregistava també el flux de calor incident en el dipòsit i el cabal descarregat a través de la vàlvula de seguretat.

Els experiments descrits per Droste es dugueren a terme al *Federal Institute for Material testing* de Berlin [SCHO 88]. També en aquest cas es mesurà la variació en les temperatures del dipòsit amb el temps. Segons aquest autor, com menor sigui el grau d'ompliment del dipòsit menor serà el temps necessari perquè es produueixi la ruptura.

Pel que fa al projecte DIERS estava més enfocat al disseny de sistemes de venteig i vàlvules de seguretat.

Els experiments de Venart, es pot dir que són també poc representatius ja que es feren a escala de laboratori i a més la font de calor era elèctrica, en aquest cas es pretenia estudiar el comportament del contingut del dipòsit, més que no pas el dipòsit en si.

En els experiments fets per la Davis Engineering es va utilitzar un model a escala 1/5 d'un dipòsit de transport de mercaderies per ferrocarril, ple d'aigua i immers en un incendi de JP-4. Les mesures realitzades eren: temperatures a la paret del dipòsit, flux de calor, temperatura del contingut i temperatura de la flama.

Per últim, els experiments de Nylung pretenien estudiar el comportament de dipòsits de gasos líquats a pressió quan es sotmetien a acció de les flames.

De tots aquests experiments els resultats que cal destacar i que es repeteixen en la majoria d'ells són els següents:

- Hi ha una gran variabilitat espacial i temporal en la temperatura de la flama dependent sobretot de les condicions meteorològiques.
- Les temperatures enregistrades a la paret del dipòsit, en la zona corresponent al vapor presenten variacions considerables. En general però, la temperatura màxima enregistrada just abans que el dipòsit falli es troba al voltant dels 600 °C.
- El flux de calor només s'enregistrarà en els experiments de la HSE, Anderson i Davis Engineering. Per aquests casos es trobà entre 90 i 104 kW m⁻², però cal tenir en compte que el combustible no era el mateix en tots els casos i que tampoc es coneixen les dimensions del bassal en cada cas, per a poder comparar.

A més d'aquests treballs es pot citar també els experiments realitzats per la *Sandia National Laboratories (Thermal Test and Analysis Division)* [GREG 89] [BAIN 88]. Els experiments es realitzaren l'any 1983 amb un bassal de 9.1 m × 18.3 m utilitzant com a combustible JP-4. Al centre del bassal hi col·locaren un calorímetre de dimensions 1.4 m × 6.1 m, per tal d'analitzar la càrrega tèrmica a la que es trobaven sotmesos grans objectes immersos en les flames. Durant les

provees es prenien les mesures en un gran nombre de punts arreu de la instal·lació: temperatura a la paret del calorímetre, flux de calor, temperatura de la flama, velocitat de combustió, condicions atmosfèriques. Aquests experiments són els que més dades aporten pel que fa a l'evolució de la temperatura de la flama amb el temps i també de les variacions espaials que aquesta presenta. Cal remarcar també les dades aportades pel que fa al flux de calor incident en el calorímetre, en funció del temps i de la posició on es prenia la mesura. Més endavant es comenten aquests resultats amb més detall.

D'altra banda cal citar també els experiments duts a terme amb bassals lliures d'obstacles, tan a gran com a petita escala, que també aporten alguna dada interessant pel que fa al comportament dels bassals de foc. En aquest contexte s'ha de fer referència al treball de Modak [MODA 81]; els incendis es feien en bassals de 0.73 m de diàmetre utilitzant com a combustible polimetilmetacrilat (PMMA) i l'objectiu era donar la distribució radial i vertical de la temperatura i del coeficient d'absorció de la flama.

Una altra sèrie d'experiments interessants són els descrits per Yamaguchi [YAMA 87], sobretot pel fet que els bassals eren de dimensions molt grans, entre 30 i 80 m de diàmetre. El combustible utilitzat era querosè sobre aigua i mesuraven la temperatura de la flama a 18 punts, la calor emesa en forma de radiació, la velocitat de combustió, la composició dels gasos emesos, la velocitat de l'aire arrossegat per les flames i la forma de la flama. Segons aquest autor els resultats mostren que no es poden extrapolar els experiments fets en bassals de menys de 10 m de diàmetre per a bassals a escala més gran.

Bosoni [BOSO 89] descriu una sèrie d'experiments duts a terme a Itàlia entre 1984 i 1987 amb bassals des de 9 a 81 m². L'objectiu d'aquestes proves era investigar l'efectivitat i conveniència en l'aplicació d'escumes AFFF polvoritzades en els incendis típics de les plataformes petrolíferes. El combustible utilitzat era una mescla de gasoil i gasolina (75% i 25% respectivament). Els resultats més interessants fan referència a l'extinció, ja que pel que fa a les flames només es mesurava la radiació en diversos punts al voltant del bassal. En una segona fase d'aquesta sèrie d'experiments es va col·locar un dipòsit al mig del bassal, equipat amb quatre

termoparells que mesuraven l'evolució de la temperatura de l'acer; l'objectiu, però, continuava essent el mateix, determinar l'eficiència del sistema d'extinció.

També a Itàlia es van dur a terme els experiments del projecte FIREXP descrits per Mangialavori [MANG 92] i Ditali [DITA92]. En aquest cas el bassal era circular amb un diàmetre entre 1 i 6 m i s'utilitzaren diferents combustibles (hexà, heptà, toluè, alcohol isobutílic). Els paràmetres mesurats eren els següents: dimensions i geometria de la flama, contorn tèrmic de la flama (mitjançant una càmara d'infraroig), temperatura del líquid i dels gasos, velocitat de combustió, poder emissiu de la superficie de la flama i flux de calor emès.

Per últim es poden citar dos treballs experimentals fets a petita escala. El primer, descrit per Stensaas [STEN 87], utilitzava una maqueta a escala 1:10 d'un mòdul de plataforma petroliera. Les mesures que es realitzaven en cada prova eren: velocitat de combustió, temperatura dels gasos en 51 punts, temperatures de l'estructura en 31 punts, temperatura del combustible, concentració de O₂, CO₂ i CO en els gasos emesos. Els resultats mostren que els incendis presenten un període transitori molt gran però que disminueix considerablement quan augmenten les dimensions del bassal. D'altra banda, la velocitat de combustió d'un incendi en un recinte tancat es redueix a la meitat quan el mateix incendi es fa a l'aire lliure.

El segon treball correspon a Gore [GORE 91]. Els experiments es dugueren a terme amb bassals de 4.6 cm, 7.1 cm i 30 cm i obtingueren resultats interessants sobre la velocitat de combustió i la fracció d'energia emesa en forma de radiació per a diversos combustibles.

2.3 Velocitat de combustió

A part dels treballs experimentals, descrits en l'apartat anterior, en els quals es mesurava la velocitat de combustió, altres autors han proposat models teòrics o semiempírics específics per tal de poder predir la velocitat de combustió en incendis de bassals. En la majoria de casos, per validar el seu model han utilitzat les dades experimentals dels treballs que ja s'han descrit a l'apartat 2.2.

Malgrat que la velocitat de combustió és un dels paràmetres més utilitzats quan es vol modelitzar qualsevol fenomen relacionat amb els incendis, pocs autors l'han estudiat en profunditat.

L'any 1984, Mudan [MUDA,84] feia una revisió dels models proposats per diferents autors per determinar la velocitat de combustió. Des d'aleshores a la bibliografia no apareixen models nous ja que la majoria de treballs que han sortit posteriorment utilitzen aquestes mateixes correlacions.

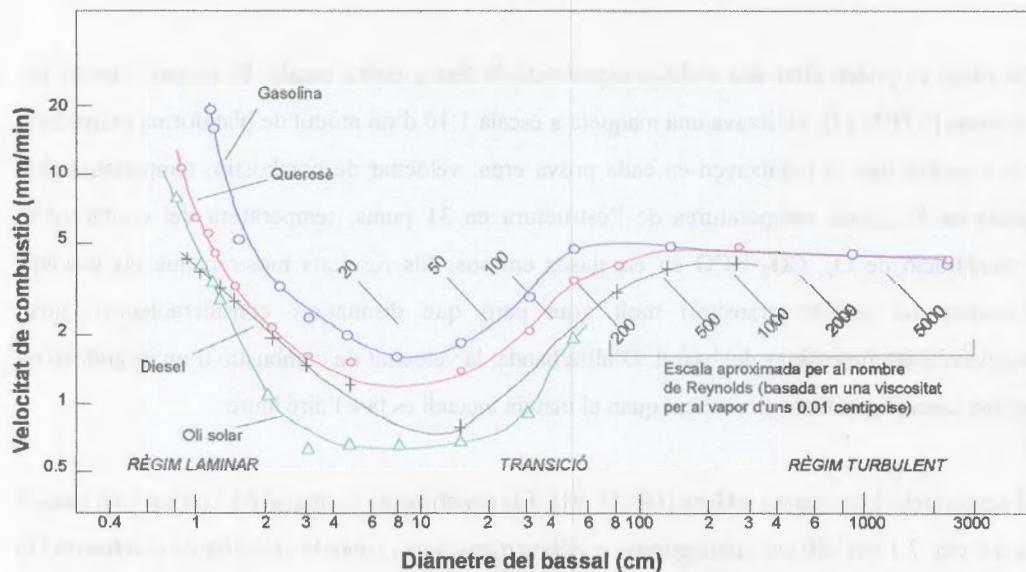


Figura 2.1 Velocitat de combustió per a diversos bassals d'hidrocarburs [MUDA,84].

Segons Mudan, el primer treball sistemàtic realitzat amb diversos combustibles i dimensions de bassals va ésser el realitzat per Blinov i Khudiakov (1957). Els resultats obtinguts en la fase experimental foren analitzats per Hottel, el qual observà que la relació entre la velocitat de combustió i el diàmetre del bassal tenia la mateixa forma per a tots els combustibles analitzats (vegeu la figura 2.1) i a més es podia relacionar amb el nombre de Reynolds.

Així es pot veure del gràfic que, per a Reynolds < 20 (règim laminar) la velocitat decreix amb el diàmetre; entre 20 ≤ Reynolds ≤ 200 la velocitat de combustió creix amb el diàmetre i finalment, a partir de Reynolds = 500 la velocitat de combustió es manté aproximadament constant i esdevé independent tant del tipus de combustible com del diàmetre del bassal. Aquest comportament, segons Hottel, va associat directament a la transferència de calor que té lloc entre la flama i el bassal, que es pot representar per:

$$\frac{\dot{Q}}{(\pi d^2/4)} = \frac{4K_c}{d} (T_f - T_a) + H(T_f - T_a) + \sigma F (T_f^4 - T_a^4) (1 - e^{-Kd}) \quad (2.1)$$

Per a bassals de diàmetre superior a un metre, únicament el darrer terme, corresponent a la transferència de calor per radiació, esdevé significatiu. Com que la calor que arriba al bassal dividida per la calor de vaporització del combustible dóna la velocitat de combustió (en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), el mateix autor proposa la següent correlació per a la velocitat de combustió:

$$\dot{y} = \dot{y}_{max} (1 - e^{-Kd}) \quad (2.2)$$

K correspon al coeficient d'extinció de la flama (vegeu el Capítol 1). Atallah i Allan [ATAL,71] dónen el valor d'aquest coeficient, determinat experimentalment per alguns combustibles líquids (vegeu la taula 2.2).

Un altre dels estudis citats per Mudan és l'efectuat per Burgess *et al.* (1961); aquests autors proposaren la següent correlació, aplicable a combustibles líquids (concretament: metanol, hidrogen líquid, gas natural liquat, butà, hexà, benzè i xilè) en la regió en la qual domina la transferència de calor per radiació (bassals de diàmetre $\geq 1 \text{ m}$):

$$\dot{y}_{max} = 1.27 \cdot 10^{-6} \frac{\Delta H_c}{\Delta H_v} \quad (2.3)$$

Aquesta expressió té la vantatge de la seva senzillesa, tot i que el fet d'adoptar una sèrie de valors mitjans —compresos en la constant— per al conjunt de combustibles implica una disminució de la precisió.

Taula 2.2 Coeficients d'extinció per alguns combustibles líquids [ATAL,71].

Liquid	$K (m^{-1})$
Etanol	0.37
Xilè	1.20
Hexà	1.90
Gasolina	2.00
Benzè	2.60
Querosè	2.60
Butà	2.70
LNG	3.00
Metanol	4.60
Hidrogen líquid	7.00

Per a combustibles on hi hagi mesgles de diversos components amb volatilitats molt diferents Mudan cita la correlació proposada per Grumer *et al.* i validada també per Burgess i Zabetakis:

$$\dot{y}_{max} = 1.27 \cdot 10^{-6} \frac{\sum_{i=1}^N n_i \Delta H_{c_i}}{\sum_{i=1}^N n_i \Delta H_{v_i} + \sum_{i=1}^N m_i \int_{T_a}^{T_b} c_p(T) dT} \quad (2.4)$$

En general aquesta equació dóna molt bons resultats per a hidrocarburs líquids, excepte pels gasos liquats on tendeix a subestimar el valor de la velocitat de combustió en un factor de 2.

Posteriorment, Mangialavori i Rubino [MANG,92], en una sèrie d'experiments realitzats dins el programa FIREXP (vegeu l'apartat 2.2) en els quals també mesuraven la velocitat de combustió, obtingueren valors molt similars pel coeficient de l'equació 2.3, concretament

$1.16 \cdot 10^{-6}$ en lloc d' $1.27 \cdot 10^{-6}$. La correlació 2.3 s'allunya del valor experimental únicament en aquells casos en què com a combustible utilitzaren alcohol isobutílic.

2.4 Calor emesa per les flames

Aquest és també un paràmetre important en l'estudi dels incendis. En general el que acapara més interès és la calor que emeten les flames en forma de radiació i que pot afectar objectes i/o persones que estiguin properes a la flama. No cal oblidar però que l'energia emesa en forma de radiació és una determinada fracció de la calor total que emeten les flames, la resta s'emet en forma de convecció (que de fet és la fracció més important).

En el model de font puntual (vegeu el Capítol 1) descrit per Mudan [MUDA,84] el paràmetre més important és precisament la fracció de l'energia total que s'emet en forma de radiació. Segons l'esmentat autor aquest paràmetre es pot obtenir a partir de dades derivades de les mesures fetes amb radiòmetres (que de fet és la manera més fiable d'obtenir-lo), però també proposa una correlació atribuïda a Moorhouse i Pritchard:

$$f = \frac{E}{\dot{m}'' \Delta H_c} \left[1 + 4 \frac{H}{d} \right] \quad (2.5)$$

Per a incendis a petita i mitjana escala, Markstein (propà, età, metà, butà i propilè), Burgess i Hertzberg (gasolina, hexà, benzè i LNG) i Burgess i Zabetakis (metanol, hidrogen i UDMH) mostren que la radiació es manté proporcional a la calor total emesa, sempre que la flama sigui totalment turbulenta. A més, demostren que la fracció d'energia emesa en forma de radiació és més gran per a diàmetres de bassal més petits, encara que hi ha fortes oscil·lacions entre els valors dels diversos autors. Els valors que donen d'aquest paràmetre van des del 17% per a bassals de metanol a 38% per a bassals de benzè.

L'any 1988 en un article publicat per Moodie [MOOD,88], aquest autor donava com a referència per a la calor total alliberada en incendis de bassals d'hidrocarburs el rang de 100-120

$\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$. Segons Moodie el valor de $100 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ és el més utilitzat a l'hora de dissenyar vàlvules d'alleugeriment que actuïn en cas d'incendi.

Més endavant en uns experiments fets a petita escala [GORE,91] en els quals es mesurava la fracció d'energia emesa en forma de radiació per a diferents combustibles, s'observà que per a flames molt poc lluminoses (metanol, hexanol i etanol) la fracció radiant es trobava entre el 17% i el 21% de la calor total alliberada. Per a flames força més lluminoses —debat sobretot a les partícules de sutge— (heptà, MMA, toluè i estirè) la fracció d'energia radiant es trobava entre el 27% i el 34%. Aquests valors concorden amb els obtinguts per Burgess *et al.* exposats anteriorment.

Uns altres resultats interessants són els derivats del projecte FIREXP [MANG,92]. En aquest cas la fracció d'energia emesa en forma de radiació es determinava a partir de les dades obtingudes de diversos radiòmetres i de la calor total alliberada calculada mitjançant la correlació:

$$Q_t = \dot{m}'' \frac{\pi}{4D^2} \Delta H_c \quad (2.6)$$

Els valors obtinguts oscil·laven entre el 30% i el 37% per a bassals d'heptà de 3 m de diàmetre i entre el 26% i el 39% per a bassals d'hexà entre 1 i 6 m de diàmetre però sense que hi hagi una relació clara entre aquesta fracció i el diàmetre del bassal. En aquest cas els resultats també són consistents amb els exposats anteriorment, encara que no mostren amb claretat que la fracció d'energia emesa en forma de radiació sigui més gran per a bassals més petits.

2.5 Temperatura de la flama

Modak [MODA,81] presenta una manera de determinar la temperatura de flama fent una inversió d'Abel a partir de la mesura de la intensitat de la radiació i de la transmissivitat. Els seus resultats, extrets dels experiments fets en bassals de PMMA de 0.73 m de diàmetre, mostren que

molt aprop del bassal (20-30 mm per sobre) i al centre d'aquest, la temperatura és relativament freda (900 K) mentre que a la mateixa alçada però a $\frac{3}{4}$ del radi és màxima (1300 K-1400 K). A mesura que augmenta l'alçada la temperatura màxima tendeix a trobar-se cap al centre del bassal. Per a alçades entre 60 i 510 mm la temperatura en el centre del bassal és aproximadament constant i igual a 1300 K. Segons aquest autor això indica que en aquesta zona els efectes de la mescla amb l'aire són més o menys uniformes, essent a més aquest efecte prou gran com per fer que aquesta temperatura estigui bastant per sota de la temperatura adiabàtica de flama. Als extrems de la flama observa que la temperatura disminueix significativament a l'augmentar l'alçada. Per l'autor això és degut a que en aquesta zona hi ha molta més mescla amb l'aire i també les pèrdues per radiació són molt més importants. Malgrat que el mètode proposat per Modak tendeix a sobreestimar la temperatura, el més important és que per a focs grans ($\phi > 0.4$ m) l'autor mostra que la temperatura no és uniforme arreu de la flama com es sol suposar generalment.

Malgrat que és sabut que la temperatura de la flama varia en l'espai i en el temps DiNenno [DINE,82] proposa, per a simplificar els càlculs, utilitzar una temperatura mitjana per a la flama entre 1200K i 1400K.

També Mudan [MUDA,84] proposa utilitzar una temperatura mitjana, encara que mesurada experimentalment. En la mateixa referència dóna alguns valors com 1240 K per la gasolina, 1200K pel JP-4 o 1600 K pel querosè.

Tunç *et al.* [TUNÇ,84], [TUNÇ,85] en l'estudi que fan sobre la radiació incident sobre un dipòsit immers en flames de JP-4, assumeixen per a la temperatura de flama un valor constant i uniforme de 1200 K.

D'altra banda, en els experiments descrits per Yamaguchi *et al.* [YAMA,87], duts a terme en bassals de querosè de 30 m, 50 m i 80 m de diàmetre, una de les mesures realitzades era la temperatura de la flama en diversos punts d'aquesta. Els resultats que obtingueren els citen molt de passada sense analitzar-los en profunditat, l'únic que remarquen són els valors màxims de

1400-1800 °C que s'assoleixen al centre del bassal i que pràcticament no varien d'un bassal a l'altre.

Un dels treballs més interessants és el publicat per Bainbridge i Keltner [BAIN,88] i per Gregory, Keltner i Mata [GREG,89] sobre els experiments duts a terme per la Sandia National Laboratories (USA) l'estiu de 1983. Es dugueren a terme tres proves amb un bassal de JP-4 de 9.1 m × 18.3 m dins el qual hi havia un calorímetre de 1.4 m de diàmetre i 6.1 m de llarg per tal d'analitzar el flux incident sobre un objecte immers en les flames. A més es mesurava la temperatura de la flama en 5 torres al voltant del calorímetre a les alçades de 1.42, 2.62, 5.49 i 11.18 m, mitjançant termoparells de tipus K. Els resultats mostren que en general la temperatura decreix a mesura que augmenta l'alçada, encara que transcorreguts aproximadament 1600 s des de la ignició, les temperatures tendeixen a igualar-se al voltant de 1200 K. Ara bé, la desviació estàndard esdevé més gran com més gran és l'alçada, degut sobretot a que l'efecte del vent també és més gran. Un altre fet destacable és la asimetria que presenta la flama i que fa que punts equivalents puguin presentar diferències importants en les temperatures enregistrades.

Aquests mateixos autors analitzen el treball fet per Tunç *et al.* [TUNÇ,84], [TUNÇ,85] en el qual, degut al fet d'haver près la temperatura de la flama constant arreu d'aquesta, els resultats que obtenen de la modelització no concorden amb els resultats experimentals. Segons Tunç el flux de calor incident en el dipòsit és màxim a la part superior i va decreixent en tot el contorn fins arribar a la part baixa on és mínim; els resultats experimentals demostren però que en realitat això succeeix exactament a la inversa, com es veurà amb més detall en el següent apartat.

Beynon *et al.* [BEYN,88] proposen un model (HEATUP) per a predir el comportament de dipòsits de LPG immersos en flames. El foc el representen per un flux de calor que és variable en el temps i en l'alçada i que segons diuen vé definit per una temperatura efectiva de la flama a la qual associen una distribució gaussiana per a poder descriure la variabilitat del flux en el temps i l'alçada. La temperatura màxima i la distribució la deixen oberta a l'usuari del model, sense donar cap més indicació al respecte. Aquesta manera de fixar la temperatura de la flama

sembla bastant arbitrària i sense cap fonament físic. Segons els autors, el model prediu bé els temps d'obertura de la vàlvula d'alleugeriment, pressió i temperatura del contingut del dipòsit i de les parets d'aquests però, evidentment, això es pot aconseguir fàcilment fixant la temperatura de flama adequada per tal que els resultats concordin ja que aquesta no té prefixada.

Moodie *et al.* [MOODI,88] descriuen una sèrie d'experiments en què un dipòit de LPG es sotmet a l'acció d'un bassal de foc de querosè, mesurant entre altres paràmetres la temperatura de la flama. Com passa en la majoria d'experiments d'aquest tipus, a l'hora d'analitzar els resultats la temperatura de la flama pràcticament no es menciona; en aquest cas únicament es dóna el rang 600-1050 K associant la fluctuació de 450 K a l'efecte del vent.

Pel que fa a les proves dutes a terme dins el projecte FIREXP [MANG,92] [DITA,92], del qual ja se n'ha parlat anteriorment, els autors estimen la temperatura de la flama indirectament a partir de la lectura obtinguda dels radiòmetres d'angle estret i utilitzant la correlació d'Stefan-Boltzman. Així, per a l'hexà obtenen una temperatura mitjana que va de 1100 K per a bassals d'1 m de diàmetre fins a 1350 K per a bassals de 6 m —aquestes temperatures s'han de considerar lleugerament inferiors a les reals ja que prenen $\varepsilon=1$ —. Encara que aparentment aquesta temperatura augmenta amb el diàmetre del bassal, això no concorda amb els resultats d'altres autors [YAMA,87].

2.6 Radiació incident sobre un objecte immers en les flames d'un bassal de foc

Roberts *et al.* [ROBE,82], a partir d'una sèrie d'experiments en què un dipòsit de 500 l (diàmetre = 0.5 m, llargada = 3 m) es troba immers en un bassal de foc de kerosè ($4\text{m} \times 2.4\text{m} \times 0.5\text{m}$) dedueixen que en estat estacionari la transferència de calor des del foc cap al dipòsit és d'uns $130 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$. Segons aquests autors el foc arriba a l'estat estacionari entre 30 i 90 segons després de la ignició (depenent sobretot de les condicions ambientals).

Tunç *et al.* [TUNÇ,84] [TUNÇ,84] proposen un model tridimensional per tal de determinar el flux de calor incident en un dipòsit immers en les flames, durant el règim estacionari. Els autors suposen que la temperatura de la flama és constant arreu d'aquesta i en el temps. Els resultats que ofereixen pretenen valorar l'efecte que tenen la temperatura de la flama i el coeficient d'absorció d'aquesta (vegeu el Capítol 1) en la radiació incident en el dipòsit, però en cap cas comparen els resultats obtinguts amb resultats experimentals reals, tot i que afirmen que hi ha una bona concordança amb els experiments descrits per Birk [BIRK,88]. Segons aquest model, la calor incident a la part superior del dipòsit és màxima al centre d'aquest i va disminuint a mesura que hom s'allunya cap a l'extrem. En principi, segons la descripció que fan del model, aquest comportament sorprèn bastant, ja que el flux hauria de ser el mateix per tots els punts que es troben a la mateixa alçada. Pel que fa al flux de calor màxim correspon a la part superior del dipòsit, mentre que el mínim es trobaria just a la part inferior d'aquest. Aquest resultat és d'entrada poc lògic si es té en compte que la temperatura de la flama disminueix amb l'alçada, com s'ha vist en l'apartat anterior; aquest resultat però es pot explicar pel fet que aquests autors han considerat que la temperatura de la flama és constant, quan en realitat s'ha comprovat que no ho és [GREG,89].

En el model proposat per Beynon *et al.* [BEYN,88] els autors consideren que el flux de calor és constant al llarg del dipòsit però que depèn de l'alçada i el calculen a partir de la temperatura de flama (segons s'ha definit ja en l'apartat 2.5). No dónen però els valors que obtenen per aquest flux sinó directament les temperatures que assoleix el dipòsit, fet que fa difícil poder comparar els seus resultats amb els d'altres models o amb resultats experimentals.

En els experiments descrits per Moodie *et al.* el flux de calor incident en el dipòsit és de l'ordre de $85 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ de mitjana, valor que segons aquests autors s'hauria de corregir per tal de tenir en compte l'absorbància del calorímetre, cosa que faria que en realitat aquest flux fos de $105 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$. Segons aquests mateixos autors, el flux màxim mesurat correspon a la part superior del dipòsit mentre que el mínim es troba a la part inferior. Això concordaria amb els resultats de Tunç *et al.*

Bainbridge i Keltner [BAIN,88] i Gregory *et al.* [GREG,89] obtenen uns resultats totalment diferents. És a dir que la part baixa del dipòsit és la que rep el flux de calor màxim —uns $110 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ — mentre que la part superior rep el flux mínim —uns $70 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ —. A favor d'aquests resultats cal dir que la instal·lació experimental està molt més ben dissenyada i permet adquirir un nombre de dades més gran i representativa de totes les zones de la instal·lació.

En general es sol considerar que el flux incident es transmet tot en forma de radiació. Aquests autors analitzen la part corresponent a convecció i a radiació mostrant que la part convectiva sol representar entre el 6.5 i el 19% del flux total incident, dependent de les dimensions relatives entre l'objecte i la flama; com més gran és el radi del cilindre menor és la part convectiva respecte el flux total.

2.7 Evolució de les temperatures a la paret d'un dipòsit immers en les flames d'un bassal de foc.

Roberts *et al.* [ROBE,82] van dur a terme una sèrie d'experiments en què un dipòsit de 500 l de capacitat que contenia 200 l d'un fluid (aigua o propà) quedava immers en les flames d'un bassal de querosè. Les proves es dugueren a terme per a comprovar l'eficàcia de diversos materials aïllants i d'aquest sistema de protecció respecte a la protecció amb aigua polvoritzada. En el cas del dipòsit sense aïllament que contenia propà, la vàlvula de seguretat es disparava passats tres minuts des de l'inici de la prova. Una dada molt significativa a tenir en compte és que així com en les proves en què el contingut del dipòsit era aigua, la temperatura a la part superior del dipòsit (zona no mullada pel líquid) era molt superior a la registrada a la part inferior del dipòsit —900 °C respecte 200 °C—; en les proves en què el dipòsit contenia propà, pràcticament no hi havia diferència entre ambdues temperatures —com a màxim 50 °C— arribant aquestes fins a 900 °C. L'explicació d'aquestes diferències està en el fet que el propà formava un film de vapor en la zona en contacte amb les parets del dipòsit, de manera que aquestes deixaven d'estar mullades pel líquid. En el cas de l'aigua, l'ebullició és nucleada de manera que el líquid mai deixa de mullar les parets del dipòsit, que poden mantenir així una temperatura molt més baixa.

Aquest fet fa resaltar la importància que té considerar les temperatures assolides pel dipòsit en la zona on no hi ha líquid o quan aquell es troba totalment buit.

En el cas en què el dipòsit estava aïllat, l'ebullició del propà era nucleada. En aquest cas si que hi havia diferència en les temperatures assolides, uns 250 °C.

En el model proposat per Beynon *et al.* [BEYN,88], es pot observar una diferència important en les temperatures assolides durant les proves i les predites pel model, molt inferiors. Segons aquests autors, el problema és que els models bi-dimensionals com el que proposen, no permeten predir les variacions de temperatura al llarg del dipòsit, encara que aquestes poden ser significatives. Cal tenir per tant en compte l'evolució de temperatures arreu del dipòsit i no valors puntuals, per a poder predir amb més fidelitat el comportament d'aquest, a més de definir millor les característiques de l'incendi.

En els experiments de la Sandia National Laboratories [BAIN,88] [GREG,89] dels quals ja s'ha parlat anteriorment, les temperatures assolides a la paret del calorímetre s'utilitzaven per calcular el flux de calor que entrava. Les dades mostren que les temperatures assolides a la part inferior del dipòsit són significativament superiors (de l'ordre del 50%) a les assolides a la part superior.

Moodie [MOOD,88], després d'analitzar els experiments fets per diversos autors, destaca que les temperatures màximes assolides per un dipòsit immers en les flames, en la zona de vapor, es troba al voltant dels 600 °C. El mateix autor [MOODI,88] mostra que la temperatura en la zona de vapor creix més ràpidament com més buit estigui el dipòsit. Així, un dipòsit ple al 22% assoleix uns 600 °C en 500 segons, mentre que el mateix dipòsit ple en un 72% presenta únicament 400 °C al cap del mateix període.

2.8 Anàlisi històrica d'accidents amb foc

L'anàlisi històrica d'accidents és una tècnica identificativa orientada a la recerca d'informació d'accidents industrials succeïts en el passat [CASA,96]. Aquesta tècnica d'anàlisi és essencialment qualitativa, però també permet extreure resultats numèrics o quantitatius 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, producte involucrat, conseqüències, etc.).

Els incendis són un dels accidents que ocorren amb més freqüència en determinades instal·lacions industrials. És per això que ha semblat interessant fer una anàlisi històrica centrada en aquest tipus d'accident, per a identificar-ne la freqüència i les tipologies més usuals.

Les dades utilitzades en aquesta anàlisi històrica s'han extret de la base de dades MHIDAS [MHID,94] (*Major Hazard Incident Data Service*), desenvolupada pel Safety and Reliability Directorate (SRD). La MHIDAS inclou accidents de 95 països, ocorreguts des de començaments de segle fins a finals de 1993, encara que periòdicament es va actualitzant.

Tot i que hi ha altres bases de dades al mercat que disposen d'un nombre més gran d'accidents (per exemple, la FACTS té al voltant de 15000 accidents), la MHIDAS conté molta més informació i està molt més ben estructurada, fets que la fan molt més interessant des del punt de vista d'anàlisi i prospecció.

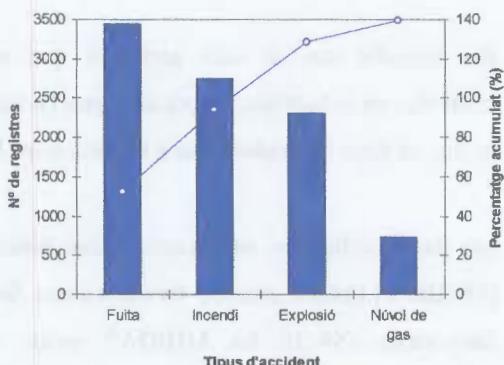
La versió que s'ha utilitzat per a fer aquest estudi conté 7029 registres corresponents a 6099 accidents ocorreguts fins el novembre de 1993. Quan en un accident hi ha involucrades més d'una substància, la base de dades associa a aquest accident tants registres com substàncies han intervenit en l'accident. Així per exemple, l'accident nº 770 (Incendi que involucrà diverses substàncies, ocorregut el 3 de juliol de 1979 a Houston, USA) té tres registres: 770A (foc amb propà gas), 770B (foc amb diesel), 770C (foc amb gas natural liquat).

Pel que fa a l'origen de la informació, les dades corresponents a aproximadament el 95% dels registres han estat recopilades per la SRD (*Safety and Reliability Directorate, GB*); en l'1% dels registres no s'indica quina ha estat la font d'informació, i el 4% restant procedeix de fonts diverses.

Els accidents enregistrats es poden classificar en una primera aproximació en 4 tipus generals: fuita, incendi, explosió i núvol de gas. La taula 2.1 mostra la distribució dels registres en funció del tipus general d'accident.

Taula 2.1 Distribució en funció del tipus general d'accident

Tipus d'accident	Nº registres	percentatge
Fuita	3448	52.15
Incendi	2745	41.52
Explosió	2303	34.83
Núvol de gas	739	11.18
Total	9235	139.67



Com es pot observar la suma de percentatges és superior a 100. Això és degut a que un mateix registre pot tenir dos o més d'aquests 4 tipus d'accident i per tant s'està comptant dues o més vegades. Es pot veure també que després de la fuita, l'incendi és l'accident que presenta un nombre més gran de registres, seguit a certa distància per l'explosió i la formació de núvols de gas. S'ha adjuntat a la taula el diagrama de Pareto corresponent, amb la línia corresponent al percentatge acumulat dels diversos accidents, que ofereix una representació més gràfica de la contribució de cada categoria en el context de tots els accidents.

Atès que els incendis constitueixen de forma específica els accidents objecte d'aquesta tesi, a partir d'aquí l'anàlisi es centrarà bàsicament en aquest tipus d'esdeveniment, que com s'ha vist a la taula 2.1 està representat en 2745 registres (en realitat, aquests registres corresponen a 2283

accidents). Nogensmenys, s'inclourà també alguna informació de tipus més general per a emmarcar aquesta categoria en el context de tots els accidents.

Taula 2.2 Classificació dels accidents en funció del tipus de substància involucrada.

Tipus de material	Nº de registres	% del Total
		Nº de registres
Conegut	2398	87.4
Desconeget	347	12.6
% de material conejut		
Líquid	1410	58.80
Gas liquat a pressió	338	14.10
Gas	294	12.26
Sòlid	239	9.97
Pols	52	2.17
Dissolució	26	1.08
Gas liquat a baixa temperatura	16	0.67
Líquid sobreescalfat	10	0.42
Gas liquat (indeterminat)	10	0.42
Llot	2	0.08
Gas dissolt	1	0.04

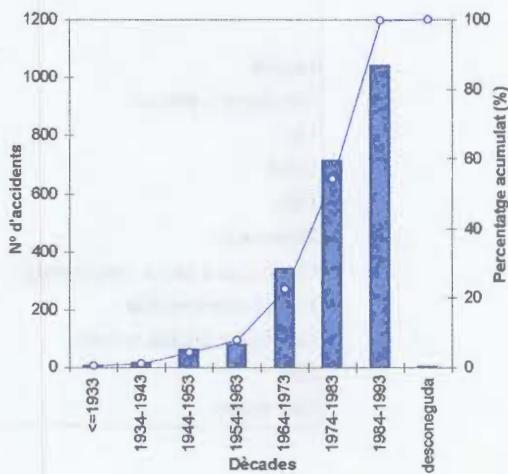
La Taula 2.2 mostra la classificació dels registres en funció del tipus de material involucrat. A [VILC,95] es pot trobar un estudi exhaustiu i general sobre tots els tipus d'accidents. En aquest cas els autors utilitzen una versió anterior del MHIDAS amb 5325 accidents. Una part d'aquest estudi ha estat reproduïda aquí amb la versió més moderna de la base de dades; ha semblat interessant veure la classificació dels accidents en funció del tipus de substància involucrada, segons la classificació contemplada en la base de dades (gas, líquid, sòlid, partícules, etc.). En la meitat dels casos aproximadament (53%) el material implicat en l'accident era un líquid, en aquest cas es pot veure que la proporció és lleugerament més gran (59%); en el 30% dels accidents es tractava de gasos (gasos i gasos liquats a pressió), en aquest cas és lleugerament inferior (26%); i en el 90% de casos hi havia un fluid involucrat, en aquest cas correspon al 88%.

2.8.1 Distribució en el temps dels accidents involucrant incendis

Com que en la base de dades utilitzada es disposa de registres fins a finals de 1994, s'ha fet la distribució comptant dècades enrera des d'aquest any. Si es fes per dècades naturals es perdria la informació dels darrers 4 anys, amb un nombre de registres significatiu.

Taula 2.3 Distribució dels registres en funció de les dècades.

Data	Nº de registres	Percentatge
≤1933	10	0.44
1934-1943	18	0.79
1944-1953	65	2.85
1954-1963	82	3.59
1964-1973	343	15.02
1974-1983	715	31.32
1984-1993	1044	45.73
desconeguda	6	0.26
<i>Total</i>		<i>100</i>



Evidentment a l'hora d'analitzar aquestes dades cal tenir en compte que hi ha efectes difícils d'avaluar, com és l'important creixement que ha experimentat la indústria química al llarg d'aquest segle, o la dificultat d'incloure en un banc de dades creat fa pocs anys, informació sobre accidents ocorreguts en la primera meitat del segle; possiblement això només ha estat possible en el cas d'accidents de gran magnitud.

La taula 2.3 i el gràfic corresponent mostren la distribució dels registres per dècades. Com pot observar-se hi ha hagut un increment notable del nombre d'accidents en les darreres dècades.

Mirant el gràfic es pot veure que aproximadament el 92 % d'aquests accidents s'han produït en els darrers 30 anys. Aquest fet cal atribuir-lo tant al creixement de la indústria en el període esmentat com també a la facilitat, cada vegada més gran, d'accedir a la informació.

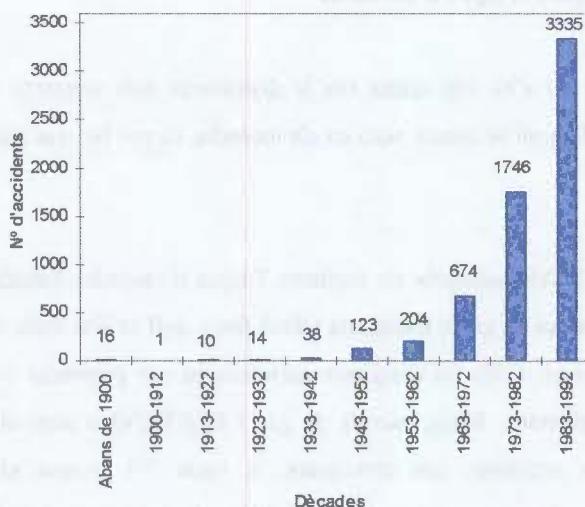


Figura 2.1 Distribució dels accidents en funció del temps [VILC,95].

De fet, l'evolució en el temps de la freqüència d'accidents involucrant incendis no és pas un tret específic d'aquest tipus d'esdeveniments, sinó que segueix la tendència general mostrada pels diferents accidents. Això es pot posar de manifest veient com ha evolucionat al llarg del temps la freqüència de tots els accidents. Prencent dades dels autors abans esmentats [VILC,95], la figura 2.1 mostra aquesta evolució que, com és evident, és de la mateixa forma que la de la taula 2.3.

La informació continguda en aquestes dues taules no ha pas de ser considerada en termes alarmistes, veient només els valors absoluts d'increment del nombre d'accidents; cal tenir en compte els efectes abans esmentats, especialment el que fa referència al considerable augment experimentat per la indústria química. De tota manera, és un fet cert que el nombre d'accidents s'ha incrementat considerablement, fent evident la necessitat de dedicar un major esforç al millorament de la seguretat.

2.8.2 Distribució segons el tipus d'accident

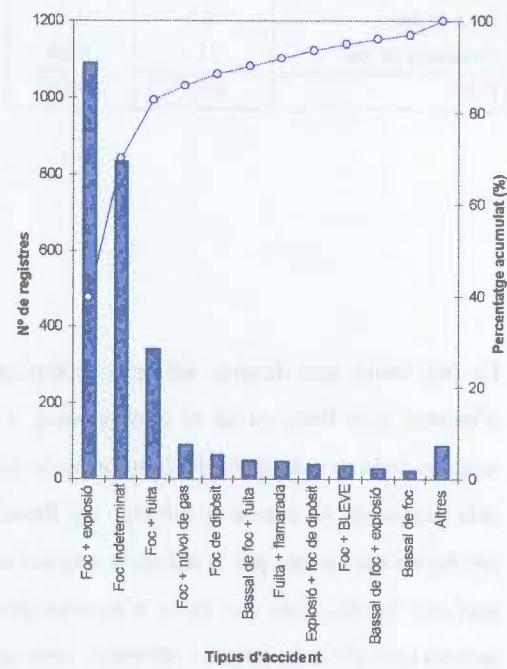
A l'inici de l'apartat 2.9 s'ha vist quina era la distribució dels registres segons els 4 tipus generals d'accidents. Si hom es centra però en els incendis, es pot fer una classificació molt més acurada.

La base de dades MHIDAS distingeix els següents 7 tipus d'incendis: bassals de foc, foc en un dipòsit, incendi d'un núvol de gas o flamarada (*flash fire*), doll de foc, bola de foc, tempesta de foc i incendi indeterminat. Cada un d'aquests accidents es pot presentar combinat amb altres tipus d'accidents (explosions, fuites, núvols de gas i BLEVE's) o amb ells mateixos. En la majoria de casos els accidents són combinats; la taula 2.4 mostra el gran nombre de combinacions que hi ha. En els casos en què es combinen dos accidents, la informació disponible no distingeix aquell que es produïa primer; és a dir, allà on diu *incendi + explosió* inclou tant els accidents on l'incendi s'ha produït primer seguit de l'explosió com aquells en què la seqüència ha estat la inversa.

La combinació de foc i explosió és la que constitueix l'accident més freqüent, amb aproximadament el 40% de registres. En segon lloc es troba el foc sense característiques específiques ("foc indeterminat"), amb el 30% de registres. Amb una incidència considerablement menor (12.5%) apareix la combinació de foc i fuita, essent els restants accidents molt menys freqüents. Cal destacar que els tres primers grups: foc combinat amb explosió, foc indeterminat i foc combinat amb fuita, representen més del 80 % dels registres d'incendis. La taula 2.4 es pot resumir en els 7 tipus bàsics d'incendi, obtenint-se la informació continguda en la taula 2.5.

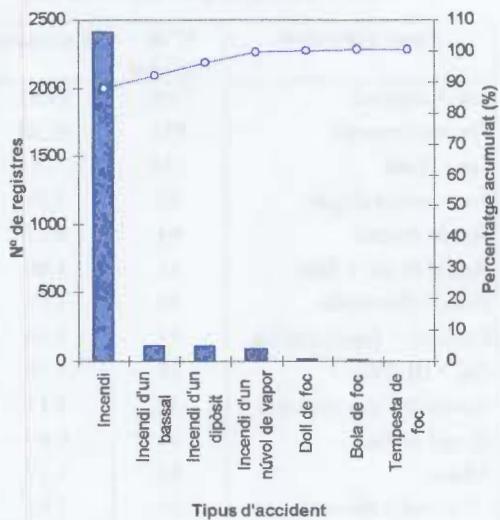
Taula 2.4 Distribució segons el tipus d'incendi, incloent les combinacions.

Tipus d'accident	Nº de registres	Percentatge
Foc + explosió	1090	39.71
Foc indeterminat	834	30.38
Foc + fuita	344	12.53
Foc + núvol de gas	92	3.35
Foc de dipòsit	64	2.33
Bassal de foc + fuita	51	1.86
Fuita + flamarada	48	1.75
Explosió + foc de dipòsit	41	1.49
Foc + BLEVE	38	1.38
Bassal de foc + explosió	32	1.17
Bassal de foc	24	0.87
Altres:	87	3.17
Explosió + flamarada	22	0.80
Flamarada	16	0.58
Fuita + doll de foc	10	0.36
Foc + bola de foc	9	0.33
Foc + bassal de líquid	6	0.22
Flamarada + núvol de gas	5	0.18
Explosió + doll de foc	3	0.11
Fuita + foc de dipòsit	2	0.07
Flamarada + foc de dipòsit	2	0.07
Bassal de foc + flamarada	2	0.07
Flamarada + bola de foc	1	0.04
Explosió + tempesta de foc	1	0.04
Doll de foc	1	0.04
BLEVE + foc de dipòsit	1	0.04
BLEVE + flamarada	1	0.04
BLEVE + doll de foc	1	0.04
Bassal de líquid + flamarada	1	0.04
Bassal de foc + núvol de gas	1	0.04
Bassal de foc + foc de dipòsit	1	0.04
Bassal de foc + bola de foc	1	0.04
Total	2745	100



Taula 2.5 Distribució segons el tipus general d'incendi.

Tipus d'accident	Nº de registres	Percentatge
Incendi	2413	87.91
Incendi d'un bassal	112	4.08
Incendi d'un dipòsit	111	4.04
Incendi d'un núvol de vapor	98	3.57
Doll de foc	15	0.55
Bola de foc	11	0.40
Tempesta de foc	1	0.04
Total	2761	100.58



Es pot veure que després del grup majoritari on hi ha els incendis indeterminats, el tipus d'incendi més freqüent és el corresponent a la ignició dels bassals de combustible. De fet, aquesta dada és coherent amb la informació continguda a la taula 2.2, segons la qual en el 53% dels accidents hi estava involucrat un líquid. Cal tenir en compte que la major part dels productes manipulats per la indústria química són fluids, entre els quals una vegada més la major part són líquids. Atès que molts d'aquests líquids són inflamables, especialment en determinats sectors (extracció de petroli i refinatge, petroquímica) és relativament freqüent que el vessament d'un d'ells, depenent de la disposició del terreny o de l'existència de cubets, origini un bassal inflamable.

2.8.3 Distribució segons l'origen de l'accident

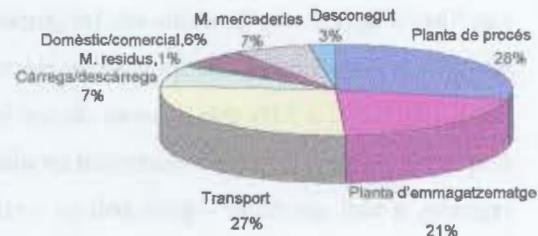
La base de dades MHIDAS considera 7 tipus diferents d'origen: planta de procés, transport, planta d'emmagatzematge, càrrega i descàrrega, magatzem de mercaderies, domèstic/comercial i magatzem de residus. Dels 2745 registres d'incendis, només el 2.5 % són d'origen desconegut.

A la taula 2.6 es mostra la distribució dels registres segons l'origen de l'accident, atenent a aquesta classificació.

Un fet que cal destacar és que la contribució més important correspon als accidents en plantes de procés (28.4%) seguit de molt aprop dels accidents ocorreguts durant el transport (27.2%); en canvi, si s'analitzen globalment tots els tipus d'accidents [VILC,95] els que es produeixen durant el transport són més nombrosos (aproximadament el 39 %). La incidència dels incendis és doncs específicament més elevada en les plantes de procés que en el transport de materials perillosos. Cal veure també que aproximadament el 50 % dels accidents tenen l'origen en àrees de procés o d'emmagatzematge dins una planta.

Taula 2.6 Distribució dels registres segons l'origen de l'accident.

Origen	Nº de registres	percentatge
Planta de procés	779	28.38
Transport	747	27.21
Planta d'emmagatzematge	574	20.91
Càrrega i descàrrega	193	7.03
Magatzem de mercaderies	191	6.96
Domèstic/comercial	164	5.97
Desconegut	69	2.51
Magatzem de residus	28	1.02
Total	2745	100.00



A banda d'aquestes tres grans contribucions, n'hi ha tres més que presenten una freqüència considerablement menor. Entre aquestes la que contribueix amb un major nombre de registres és la de càrrega/descàrrega i és interessant notar que un 7% dels incendis té lloc en operacions de càrrega/descàrrega; tot i que aquestes són operacions considerades habitualment perilloses i delicades (és ben coneguda la possible formació d'atmosferes dins els límits d'inflamabilitat en l'ompliment o el buidatge de dipòsits, per exemple, o la possible formació d'electricitat estàtica

deguda al moviment de fluids), sembla que caldria fer un esforç suplementari per augmentar encara més la seva seguretat.

2.8.4 Distribució segons la font d'ignició

La MHIDAS distingeix 5 tipus generals de font d'ignició: autoignició, guspries elèctriques, flames, guspries per fregament i superfícies calentes, que són de fet les fonts d'ignició més usuals en instal·lacions industrials. En aquest cas però el més destacable és que el 76% dels registres tenen la font d'ignició desconeguda. Això pot ser atribuït al fet que aquesta és una informació que moltes vegades no és pas evident, existint freqüentment diverses fonts possibles; com que sovint la instal·lació queda destruïda o almenys seriosament afectada per l'incendi, la posterior investigació —si és que existeix— difícilment pot aclarir aquest aspecte. La taula 2.7 mostra la font d'ignició general i específica dels registres en què aquestes són conegeudes.

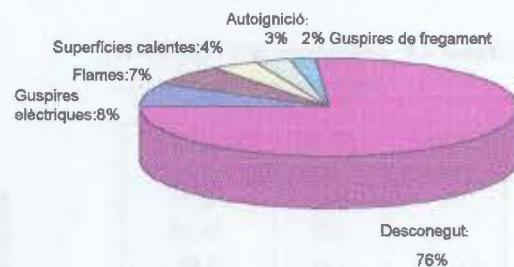
Les fonts d'ignició més freqüents són les guspries elèctriques i les flames. Dels 654 registres en els quals la font és coneuguda, les guspries elèctriques són responsables de 217; és a dir, gairebé del 8% del total i el 33% dels casos en els que la font d'ignició és coneuguda, essent l'origen més freqüent d'aquestes guspries l'electricitat estàtica. Les flames han estat la causa d'ignició en 187 registres; a títol anecdòtic —però amb un rerafons molt interessant— es pot observar que en aproximadament el 6.5% dels casos les flames foren provocades per l'encesa de llumins.

Amb nombres de registres molt menors apareixen les guspries originades mecànicament per fregament, les superfícies calentes i l'autoignició de materials.

Aquesta taula permet observar la indeterminació que, en major o menor grau, apareix sovint en aquest tipus d'anàlisi degut a la manca de completeness i de definició de la informació continguda en la base de dades. Així, pot notar-se el solapament existent entre els conceptes “guspries de fregament”, “efectes de fricció” i “partícules incandescents”. De tota manera, aquesta indefinició sol afectar només a una petita part de la informació, sense alterar essencialment els resultats de l'anàlisi.

Taula 2.7 Distribució dels registres segons la font d'ignició general i específica.

Font d'ignició	Nº de registres	Percentatge
Autoignició:	83	3.02
Guspires elèctriques:	217	7.91
- vehicles	46	21.20
- Motors	20	9.22
- Instruments	26	11.98
- domèstiques	12	5.53
- estàtica	81	37.33
- desconegut	32	14.75
Flames:	187	6.81
- formes	25	13.37
- calderes	15	8.02
- estufes	12	6.42
- flames	42	22.46
- llumins	12	6.42
- desconegut	81	43.32
Guspires de fregament:	63	2.30
- maquinària	8	12.70
- eimes	10	15.87
- desconegut	45	71.43
Superfícies calentes:	104	3.79
- tubs d'escapament	18	17.31
- canonades de vapor	11	10.58
- efectes de fricció	12	11.54
- partícules incandescents	22	21.15
- desconegut	41	39.42
Desconegut:	2091	76.17
Total	2745	100.00

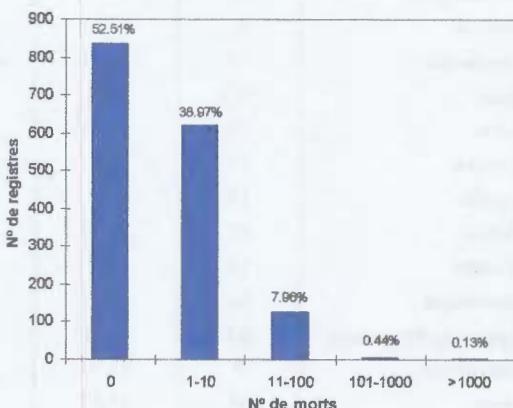


2.8.5 Distribució segons la població afectada

El MHIDAS classifica la població afectada en tres categories: morts, ferits i evacuats. Pel que fa als accidents del tipus incendi, únicament en el 58% dels casos es coneixen el nombre de morts i en el 60.5% es coneixen el nombre de ferits. Les taules 2.8 i 2.9, juntament amb els gràfics adjunts, mostren la distribució segons categories arbitràries (0 morts, 1-10 morts, etc.) per a aquells accidents en els que aquesta informació és coneguda.

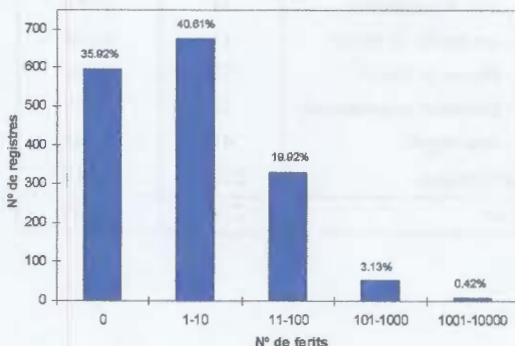
Taula 2.8 Distribució dels registres en funció del nombre de morts.

Nº de morts	Nº de registres	Percentatge
0	838	52.51
1-10	622	38.97
11-100	127	7.96
101-1000	7	0.44
>1000	2	0.13
Total	1596	100.00



Taula 2.9 Distribució dels registres segons el nombre de ferits.

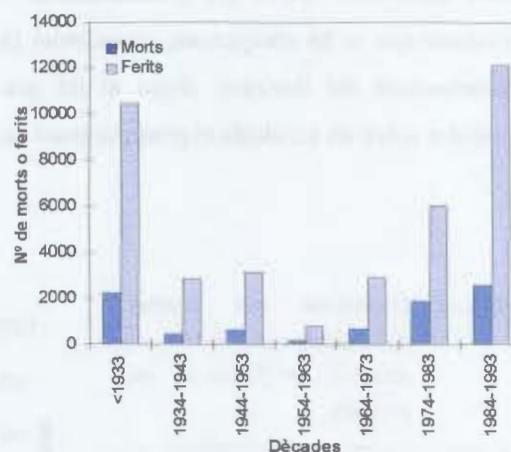
Nº de ferits	Nº de registres	Percentatge
0	597	35.92
1-10	675	40.61
11-100	331	19.92
101-1000	52	3.13
1001-10000	7	0.42
total	1662	100.00



En més de la meitat dels registres (52.5%) no hi hagué víctimes mortals. En un nombre molt elevat de registres (622, 39%), però, hi hagué un nombre de morts comprès entre 1 i 10. En el 47% dels casos el nombre de morts estigué comprès entre 1 i 100. Com succeeix en tots els accidents, el nombre de casos en els que el nombre de víctimes mortals és molt elevat disminueix extraordinàriament: 7 registres per a 101-1000 morts, i només 2 registres amb més de 1000 morts (correspondents ambdós a un sol accident ocorregut l'any 1917 a Halifax, Canadà. Col·lisió entre dos vaixells; un d'ells duia clorbenzè i un sòlid explosiu, lyddite, l'altre vaixell estava abandonat. L'accident ocasionà uns 2000 morts i 9000 ferits).

Taula 2.10 Distribució del nombre de morts i de ferits en funció de les dècades.

Dècada	Nº morts	Nº ferits
<1933	2210	10458
1934-1943	477	2873
1944-1953	637	3167
1954-1963	177	826
1964-1973	712	2920
1974-1983	1906	6084
1984-1993	2558	12131
desconeguda	1	8



Pel que fa al nombre de ferits la situació és lleugerament diferent. Només en el 36% dels accidents no hi hagué ferits, mentre que en quasi el 41% dels casos el nombre de ferits estigué comprès entre 1 i 10. En el 60.5% dels casos el nombre de ferits estigué comprès entre 1 i 100, i només en 7 accidents el nombre de ferits fou superior a 1000 (entre ells hi ha l'accident d'Halifax citat anteriorment i l'accident ocorregut a Ciutat de Mèxic l'any 1984, amb més de 500 morts i uns 2500 ferits).

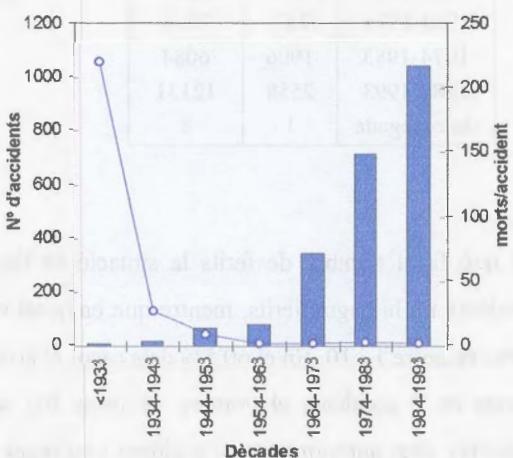
Un altre aspecte interessant d'analitzar és la distribució dels morts i els ferits en funció del temps. La taula 2.10 mostra aquesta distribució, utilitzant novament dècades comptades des de

1993. En aquest cas cal treballar amb accidents i no amb registres del MHIDAS; ja que els morts associats a un accident es comptabilitzarien tantes vegades com registres hi hagi associats a dit accident. Pot observar-se que tant el nombre de morts com el de ferits és aproximadament estacionari durant una quarentena d'anys (de 1934 a 1973), augmentant seguidament de forma continuada.

Aquest gràfic resulta però poc representatiu si no es relaciona amb el nombre d'accidents ocorreguts. Com s'ha comentat a l'inici de l'apartat 2.9, el nombre de registres ha anat augmentant al llarg del segle i per tant és lògic que augmenti també el nombre de morts. El que és molt significatiu però és que a començaments de segle el nombre de morts és, pel nombre d'accidents que hi ha enregistrats, elevadíssim (vegeu taula 2.11). Això és probablement un emmascarament del fenòmen, degut al fet que —com s'ha esmentat abans— les dades disponibles sobre els accidents ocorreguts abans de 1934 són molt limitades.

Taula 2.11 Distribució del nombre d'accidents i dels morts per accident, en funció de les dècades.

Dècada	Nº accidents	morts/accid.
<1933	10	221.00
1934-1943	18	26.50
1944-1953	65	9.80
1954-1963	82	2.16
1964-1973	343	2.08
1974-1983	715	2.67
1984-1993	1044	2.45



És lògic suposar que el que ens ha arribat del primer terç de segle és una informació seleccionada que fa referència només als grans accidents (és a dir, accidents amb greus conseqüències i gran impacte), capaços de generar informació amb un volum i una qualitat prou grans per a sobreviure el pas del temps. És per això que aquests accidents comporten un elevat índex tant de morts com de ferits.

D'altra banda, dels 2283 accidents totals, en 411 (18%) no hi va haver ni morts ni ferits i en 718 (31%) no es coneixen aquests dos valors. El 51% restant correspon a accidents que van tenir algun mort o algun ferit (o ambdues coses).

2.8.6 Probabilitat acumulada de morts en accidents

A partir de la base de dades no és possible obtenir freqüències (mortos/any) corresponents a cada accident, ja que no és segur que tots els accidents amb víctimes hi estiguin recollits. Malgrat tot, si s'assumeix que la mostra continguda en la base de dades és representativa, aleshores es poden obtenir les freqüències relatives per a l'ocurrència d'accidents amb un nombre de morts superior a un valor donat.

Les corbes de risc social es poden obtenir així posant com a ordenades els valors de freqüència relativa, essent el valor 1 el corresponent a tots els accidents amb víctimes mortals. Cal aleshores representar en un diagrama logarítmic, les probabilitats acumulades d'ocurrència d'un determinat nombre de morts. Aquest tipus de corbes es solen anomenar corbes f/N [HAAS,90] [RØME,93] [VILC,95].

Aquest tipus de representació s'utilitza per a determinar si la probabilitat d'ocurrència d'un tipus d'accident amb una gravetat determinada és proporcional a la probabilitat d'ocurrència d'un altre accident de gravetat diferent. És a dir que, per exemple, la probabilitat de tenir un accident amb més de 100 morts és aproximadament deu vegades inferior que la probabilitat de tenir un accident amb més de 10 morts.

Per a fer l'anàlisi cal prendre els registres amb un nombre de morts superior a zero i agrupar-los en categories, segons el nombre de morts. Per a cada categoria es calcula la probabilitat acumulada o freqüència mitjançant la següent expressió:

$$P(x \geq N) = F_j = \frac{\sum_{i=j}^n N_i}{\sum_{i=1}^n N_i} \quad (2.7)$$

A la figura 2.2 s'ha representat la corba f/N per als 2745 registres corresponents a incendis. La corba obtinguda es pot aproximar per una línia recta de pendent -0.909 ($r^2 = 0.95$). Això indica que la probabilitat d'un accident que tingui 10 o més morts és 9.1 vegades més gran que la d'un accident que tingui 100 o més morts.

Aquesta dada es pot comparar amb els resultats obtinguts per altres autors. Vilchez *et al.* [VILC,95], en l'estudi que ja s'ha comentat prèviament, obtenen una pendent de -0.84 sobre un total de 1399 registres que inclouen tot tipus d'accident. En una anàlisi feta sobre 510 accidents (ocorreguts en instal·lacions fixes, canonades, i transport per carretera i ferrocarril), Haastrup i Brockhoff [HAAS,90] obtingueren una recta de pendent -1. És interessant també, comparar aquests valors amb els corresponents a accidents naturals (terratrèmols, inundacions, etc.); Fryer i Griffiths [FRYE,79] en un estudi sobre accidents naturals ocorreguts durant aquest segle trobaren pendents molt més petites, entre -0.4 i -0.7. Els mateixos autors en un treball sobre explosions, incendis i accidents en mines i en el transport per mar obtingueren corbes f/N que es podien aproximar a rectes de pendent -1 i -1.1.

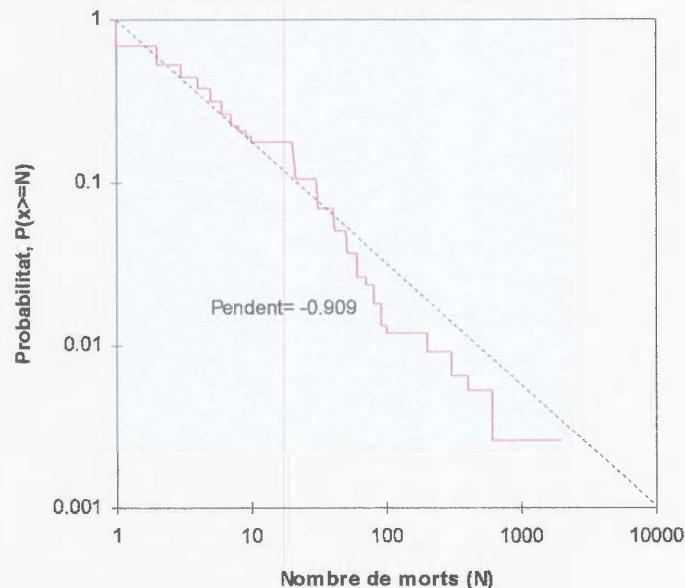


Figura 2.2 Probabilitat acumulada d'un accident amb N morts.

En conjunt, aquesta anàlisi històrica posa de relleu la importància que tenen els incendis en el context dels diversos accidents que tenen lloc en la indústria, el transport de mercaderies perilloses i l'extracció de petroli. Tant pel que fa a la seva freqüència com a les seves conseqüències, els incendis constitueixen un greu flagell en aquestes activitats, requerint-se encara un notable esforç de recerca per a fer front a aquesta situació i aconseguir augmentar la seguretat de determinades instal·lacions.

In the previous section, the importance of strategic planning in setting strategic direction and establishing the framework for strategic planning was highlighted. However, it is important to note that strategic planning is not a static process. Strategic planning is a dynamic, iterative process involving continuous assessment, planning, and implementation. This section will discuss the key components of strategic planning, including the planning cycle, the planning process, and the planning tools.

**CAPÍTOL 3. DESCRIPCIÓ DE LA INSTAL·LACIÓ
EXPERIMENTAL**

БЕЛАРУСЬ 2012 30 БЕЛВАЛЮТ БАНКУ

БЕЛВАЛЮТ

CAPÍTOL 3. DESCRIPCIÓ DE LA INSTAL·LACIÓ EXPERIMENTAL

3.1 Introducció

De les proves realitzades, una part fetes a petita escala es dugueren a terme a Itàlia. En aquestes proves, a les quals es va participar, s'estudiava el comportament d'un bassal de 80 cm de diàmetre, utilitzant els mateixos combustibles que després s'utilitzarien en les proves a gran escala. Les proves a gran escala es van dur a terme al Departament de Tecnologia del Foc de l'Institut Nacional d'Assajos i Recerca de Suècia (The Swedish National Testing and Research Institute - Department of Fire Technology), situat a Boras. La nau on es feien les proves, de dimensions 18m x 22m i alçada 20m, estava equipada amb un calorímetre de gran capacitat (al voltant de 10 MW), constituït per una campana de 6 m de diàmetre situada 8 m per damunt del terra i connectada a un sistema d'evacuació per tal de recollir tots els gasos generats en la combustió. La calor total generada es podia determinar fent mesures contínues de la velocitat, temperatura i contingut d'oxigen dels gasos recollits.

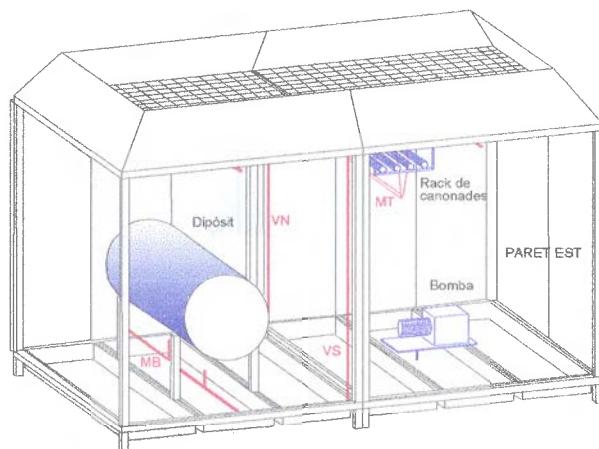


Figura 3.1 Esquema general del mòdul de proves

Per tal de fer les proves en un entorn el màxim semblant a una situació real, es va projectar una maqueta (vegeu la figura.3.1) del que podria ser un mòdul d'una planta de procés o fins i tot d'una plataforma petrolífera i es va situar sota el calorímetre.

3.2 Descripció del mòdul de proves

El mòdul de proves (vegeu la figura. 3.2) estava constituït per dos sub-mòduls de les mateixes dimensions, anomenats mòdul Est i Oest, soldats entre ells per l'estructura quedant unides així les dues zones. Les parets Nord i Est del mòdul conjunt estaven constituïdes per plaques d'acer de 4 mm de gruix, mentre que els costats Sud i Oest es trobaven oberts, podent-se observar l'interior del mòdul.

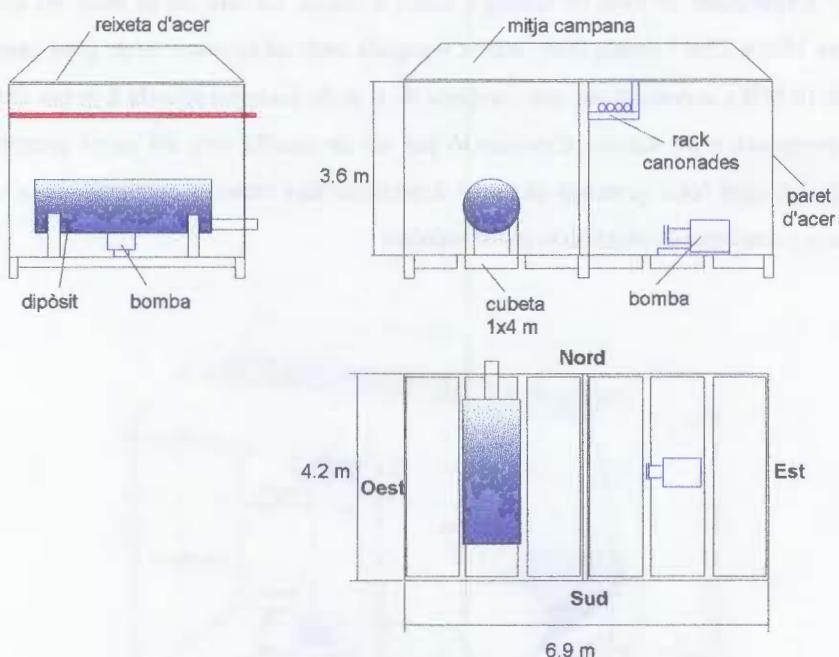


Figura 3.2 Esquema detallat del mòdul de proves.

El terra del mòdul estava format per sis cubetes — tres en cada sub-mòdul — d'1 m x 4 m i 15 cm de profunditat, disposades sobre unes bigues horizontals a 40 cm del terra, evitant així el contacte de les cubetes amb aquest. Cada una de les cubetes disposava d'un sistema de control de nivell i drenatge per evitar el sobreeiximent del seu contingut. A cada una de les cubetes se li va donar un nom , per tal de poder classificar les proves amb més facilitat: cubeta oest externa (COE), cubeta oest central (COC), cubeta oest interna (COI), cubeta est interna (CEI), cubeta est central (CEC) i cubeta est externa (CEE) (vegeu la figura 3.2). El sostre del mòdul estava construït per una reixa d'acer que permetia el pas dels fums . Tot al voltant , un inici de campana obligava als fums a anar cap el calorímetre.

A l'interior del mòdul de proves hi havia un dipòsit cilíndric d'acer, una bomba i un rack de canonades. El dipòsit cilíndric estava situat al centre del mòdul Oest, amb 1.2 m de diàmetre i 3 m de llargada, la paret era de 4 mm de gruix. El rack de canonades es trobava a la zona interna del mòdul Est; estava format per 4 tubs d'acer de 90 mm de diàmetre i 4 mm de gruix de paret, separats entre ells 50 mm i amb el centre a 0.65 m del sostre. La bomba estava col.locada al mig de la cubeta central del mòdul Est; era una maqueta formada per un cub d'acer de 0.5 m de costat i 4 mm de gruix de paret; en un dels costats del cub s'hi col.locà un tub amb una brida.

3.3 Combustibles utilitzats

Durant les proves s'utilitzaren tres tipus de combustible: heptà, hexà i querosè. Aquests productes, que han estat utilitzats en altres estudis experimentals sobre incendis, es van seleccionar pel fet de representar un ampli ventall d'hidrocarburs. L'hexà pot considerar-se representatiu dels hidrocarburs lleugers, l'heptà pot considerar-se un hidrocarbur de volatilitat mitjana, i finalment el querosè representa els hidrocarburs pesants. D'aquesta manera s'obtenen dades experimentals corresponents a les diferents situacions accidentals que poden ocurrir en les instal·lacions industrials. A la taula 3.1 es poden veure algunes de les propietats més importants d'aquests productes.

Taula 3.1 Propietats més importants dels combustibles utilitzats durant les proves.

<i>Propietat</i>	<i>Heptà</i>	<i>Hexà</i>	<i>Querosè</i>
Nom comercial	Exxol 94/99	n-hexà 95%	Asol D65
Densitat (kg/m ³)	710	664-669	785-805
Punt d'inflamació (°C)	-4	< -20	62 min.
Temperatura d'ebullició (°C)	98,5	68,7	227
Calor de vaporització (KJ·kg ⁻¹)		340	200
Calor de combustió (MJ·kg ⁻¹)	44,6	44,7	43,2
C _p (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	2.120	2.203	1.965

L'hexà i el querosè s'emmagatzemaven en dipòsits a l'exterior de la nau on es dugueren a terme les proves; l'heptà s'emmagatzemava en un dipòsit a l'exterior però soterrat. Això feia que la temperatura de l'hexà i el querosè estigués entre 1 i 5 °C, mentre que la de l'heptà fos aproximadament de 10 °C.

Just abans de cada prova es bombejava el combustible necessari per a l'experiment. Després de cada prova el combustible remanent i l'aigua (amb o sense escuma) utilitzada durant l'extinció es portaven cap a un dipòsit per a la seva destrucció posterior.

3.4 Descripció de la instal.lació d'extinció i dels agents extintors utilitzats

Per tal de poder disposar de la màxima flexibilitat a l'hora de realitzar les proves, es van instal.lar al mòdul sis canonades de distribució d'aigua (vegeu la figura 3.3).

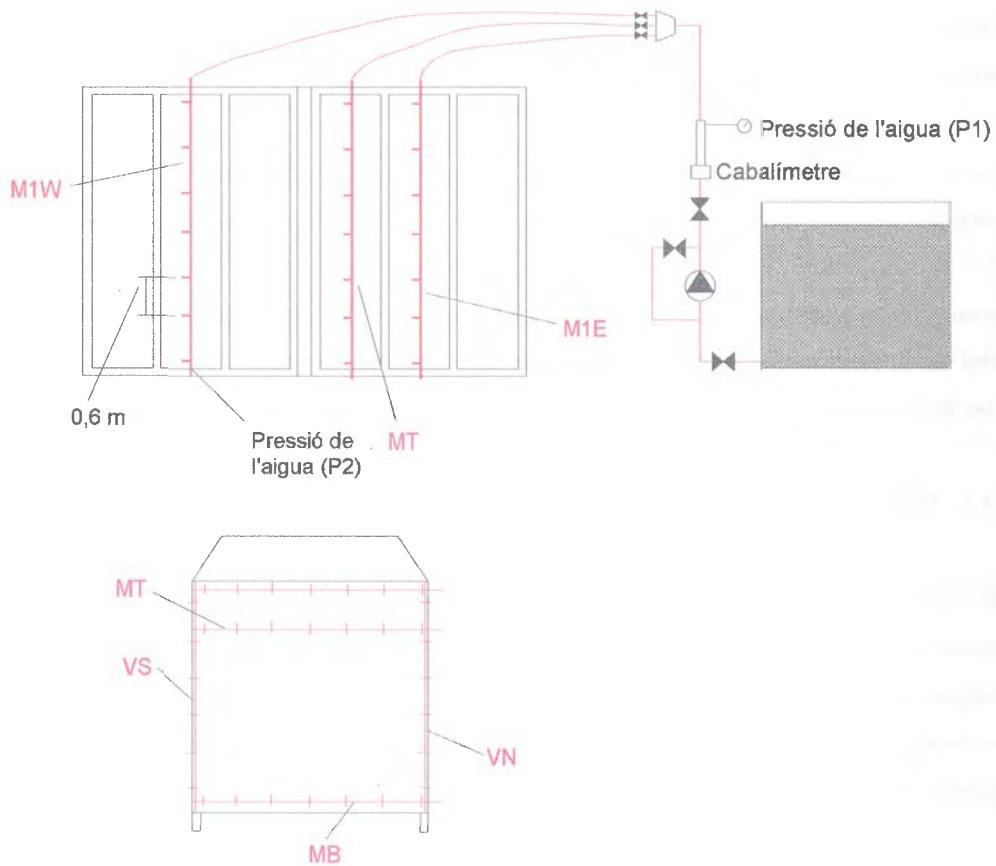


Figura 3.3 Disposició del sistema d'extinció

Dues de les canonades (anomenades M1E i M1W, respectivament) es troaven a la part central del sostre dels mòduls Est i Oest. La tercera es troava damunt la cubeta central oest (CCO) per a poder protegir el cilindre des de sota (anomenada MT).

Les dues darreres (anomenades VN i VS, respectivament) estaven col·locades verticalment a les cantonades NordOest i SudOest del mòdul Est, per a poder-les utilitzar com a protecció addicional dels dos submòduls.

Totes les canonades eren d'acer galvanitzat de 38 mm de diàmetre interior i disposaven de sortides cada 0.6 m per a poder posar els ruixadors en un gran nombre de posicions.

L'aigua o la solució d'escuma utilitzades segons la prova, s'obtenien d'un dipòsit d'1m³ situat al costat del mòdul. La temperatura, tant de l'aigua com de la solució d'escuma, era sempre de 20±2 °C. El cabal i la pressió suministrades es mesurava mitjançant un cabalímetre de flux màssic i un transductor de pressió situats just després de la sortida de la bomba. La pressió i cabal suministrats per la bomba es regulaven de dues maneres: variant el factor K dels ruixadors o bé mitjançant una vàlvula i un by-pass després de la bomba.

3.4.1 Ruixadors i cabals de disseny

Al capítol 1 (apartat 1.4.2) s'ha parlat dels diferents tipus de sistemes d'extinció que s'utilitzen actualment, entre ells hi ha els sistemes fixos d'extinció amb ruixadors i/o polvoritzadors d'aigua-escuma, que és el sistema que s'ha utilitzat en l'experimentació per a dur a terme l'extinció dels incendis realitzats en cada prova. Els dos tipus de becs que s'utilitzen en aquests sistemes són els ruixadors i els polvoritzadors d'aigua-escuma.

Els ruixadors d'aigua-escuma (*foam-water sprinklers*) són del tipus de bec obert —com els que s'utilitzen en els sistemes de diluvi. Estan dissenyats per rebre la solució d'aigua amb escumògen, barrejar-la amb aire i polvoritza-la de manera que es formi l'escuma, la qual es dirigeix des del bec obert contra el deflector, dissenyat per tal que distribueixi l'escuma de manera comparable a la distribució amb aigua sola dels ruixadors estàndard. La descàrrega és sempre cap avall encara que el ruixador es pot col·locar cap per amunt o cap per avall. A la figura 3.4 es pot veure un d'aquests ruixadors col·locat cap per avall.

Pel que fa als polvoritzadors d'aigua-escuma (*foam-water spray nozzles*) disposen també d'una part on es forma l'escuma i d'una altra part amb un deflector que la distribueix. El mecanisme per a la formació de l'escuma és el mateix que en els ruixadors però la distribució es farà d'una

manera especial depenent del capçal que porti. A la figura 3.5 es pot veure un esquema d'aquests tipus de polvoritzadors.

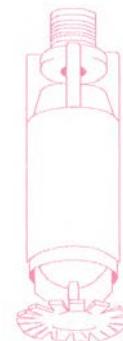


Figura 3.4 Esquema d'un ruixador d'aigua-escuma col·locat cap per avall

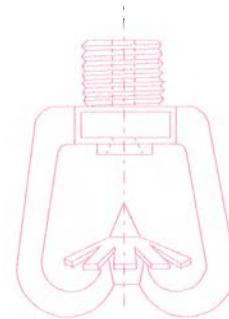


Figura 3.5 Esquema d'un polvoritzador d'aigua-escuma.

Durant les proves s'utilitzaren dos tipus de ruixadors —anomenats SPK0 i SPK1— i un tipus de polvoritzador —anomenat SPY0—. Per tal d'aconseguir aplicar diferents cabals i cobertures es varen utilitzar diferents mides (factor K) i angles d'obertura d'aquests ruixadors i polvoritzador. El factor K es defineix com:

$$K = \frac{\text{Cabal (l/min)}}{\sqrt{\text{Pressió (bar)}}} \quad (3.1)$$

Per tant, el factor K defineix la gamma de cabals i de pressions en la qual es pot treballar amb un determinat ruixador.

L'angle d'obertura és un paràmetre físic del ruixador; ruixadors amb angles d'obertura diferents donaran àrees de cobertura també diferents (vegeu la figura. 3.6).

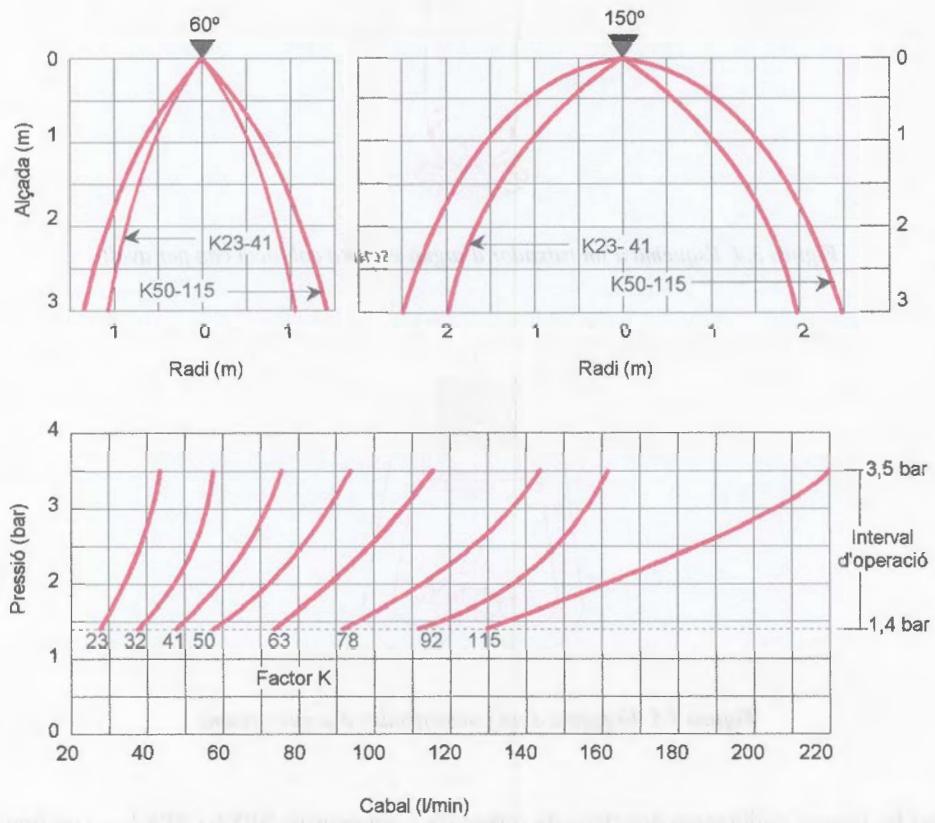


Figura 3.6 Comportament del ruixador en funció del seu angle d'obertura i del factor K. a) Perfil de distribució vertical aproximats, a una pressió de 3 bar; b) Gràfic de pressió en funció del cabal per a diferents factors K.

La selecció dels ruixadors a utilitzar es realitzà en base a estudis anteriors efectuats per grups o entitats expertes en el tema [BOSO89], [INGA92], [KOKK90], [TECSA89] i segons els següents criteris:

- El ruixador ha d'estar disponible comercialment i ésser reconegut per algun organisme oficial.
- Ha de donar prou escuma com perquè tenint en compte la relació d'expansió i el drenatge, tingui una capacitat extintora acceptable.
- L'escuma generada ha de ser el màxim d'homogènia possible, evitant que es formin gotes molt grans amb poca expansió ja que aquestes fan decréixer la capacitat extintora.
- El con format ha de ser preferiblement ple, més que no pas buit de dins.
- El con format ha de ser resistent a l'efecte deformador del vent.
- El model escollit ha d'estar disponible en un ampli ventall d'angles d'obertura, pels quals ha de presentar característiques similars.

Segons aquests criteris, els millors ruixadors són els de con invertit i velocitat mitjana.

Es varen escollir doncs dos ruixadors d'aquest tipus, de dues cases comercials diferents (que per raons de confidencialitat no poden citar-se aquí) ja que tenien propietats generals semblants però característiques de la polvorització bastant diferents.

Quant al polvoritzador, s'utilitzà del tipus "trena". A la taula 3.2 es donen les especificacions tècniques de cada un dels ruixadors utilitzats.

Taula 3.2 Especificacions tècniques dels ruixadors i polvoritzador utilitzats.

Tipus	Material	Angle obertura (°)	Factor K	Cabal a 3 bar (l·min ⁻¹)	Cabal a 5 bar (l·min ⁻¹)
SPK0	Llautó	125	34,0	58,9	76
		125	38,2	66,2	85,4
		90	58,8	101,8	131,5
	Llautó	125	58,8	101,8	131,5
		90	80,0	138,6	178,9
	Ni/Llautó	125	80,0	138,6	178,9
		125	99,5	172,3	222,5
SPK1	Ni/Llautó	120	32,0	55,4	71,5
		90	82,6	143,0	184,6
		90	114,9	199,0	256,9
SPY0	AISI 316	90	24,4	42,2	54,5
			37,5	64,9	83,8
			55,1	95,4	123,1
			74,9	129,8	167,5

Per escollir els cabals d'aplicació ($\text{l} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$) durant les proves, s'utilitzaren les recomanacions donades a ITR-Information: "Fixed water spray and deluge protection for oil and chemical plants" [IRI91].

Taula 3.3 Distribució dels ruixadors necessària per a obtenir diferents cabals d'aplicació.

Cabal d'aplicació ($\text{l} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$)	Nº de ruixadors a cada mòdul	Distància (m)	Àrea de cobertura (m^2)	Cabal per ruixador ($\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$)
6,5				84
10,2	1	3,6 x 3,6	12,96	132
14,2				184
20,4				264
6,5				56
10,2	2	2,4 x 3,6	8,64	88
14,2				123
20,4				176

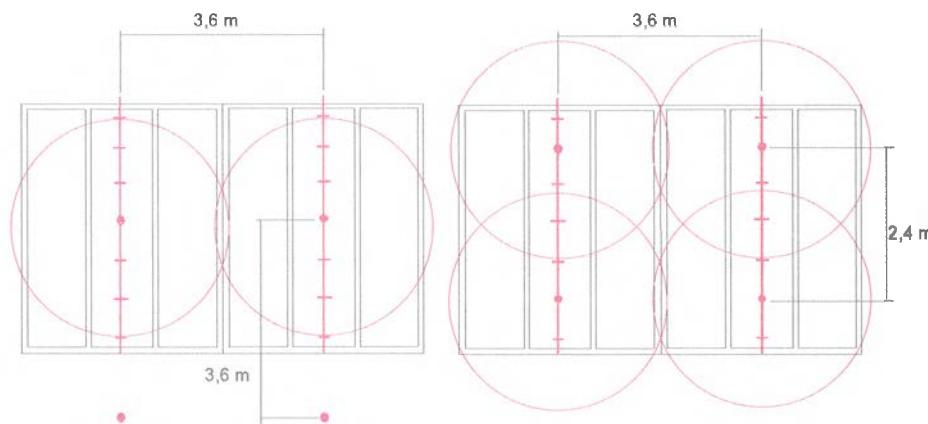


Figura 3.7 Esquema de la distribució dels ruixadors segons els cabals d'aplicació desitjats.

Per aconseguir els cabals d'aplicació desitjats cal collocar un determinat nombre de ruixadors disposats d'una manera concreta. La distància entre les dues canonades de distribució, M1W i M1E, està fixada —3,6 m—, però els ruixadors es poden collocar al llarg de la canonada en diferents posicions (cada 0,6 m). En funció d'això, a la taula 3.3 es pot veure quina és la distribució requerida per obtenir cada un dels cabals d'aplicació desitjats (vegeu també la figura 3.7).

3.4.2 Tipus d'agents extintors utilitzats

Hi ha 3 tipus bàsics d'escumes que es poden utilitzar en sistemes amb ruixadors i/o polvoritzadors:

1. *Escumes proteïniques*, són concentrats d'escumes sintetitzats a partir de la hidròlisi de proteïnes, que a més porten additius estabilitzants i inhibidors. Normalment vénen preparades per utilitzar-les en concentracions del 3 o 6 % en la barreja amb aigua.

2. *Escumes fluoroproteíiques*, són molt semblants a les anteriors però a més porten incorporat un additiu fluorinat d'acció surfactant. Formen una capa d'escuma que impedeix a l'aire de penetrar alhora que inhibeix la vaporització del combustible. També es solen utilitzar en concentracions del 3 o 6 %.
3. *Escumes formadores de film aquós (AFFF)*, es tracta de surfactants fluorinats, amb estabilitzants i additius. Aquestes escumes actuen com una barrera al pas de l'aire o oxigen cobrint la superfície amb un film aquós que impedeix també el pas dels vapors combustibles. Igual que en els dos casos anteriors s'utilitzen en concentracions del 3 o 6 %.

En la majoria de proves l'agent extintor utilitzat fou escuma, encara que a efectes comparatius alguns tests es van fer amb aigua sola. El tipus d'escuma utilitzat fou l'AFFF, fabricat per SABO a Itàlia. Les seves característiques són:

AFFF	3%
Hydral-3	
Aqueous Film Forming Foam	
Proporció de barreja, 3%	
Temperatures de treball: -12°C/+45°C	

Les proves de qualitat de l'escuma pel que fa als aspectes d'expansió i drenatge (no de característiques físiques i químiques) es van fer d'accord amb la norma ISO DIS 7203-1: "Fire Extinguishing media —Foam Concentrates— Part 1, Specification for low expansion foam concentrates for top application to water-immiscible fuels".

3.5 Descripció del sistema de mesura i aparells utilitzats

Durant les proves es realitzaven tota una sèrie de mesures: calor alliberada, radiació, temperatures, cabals i pressió de l'aigua i del combustible. Totes les proves es filmaren en video, així com també en un sistema d'infraroig per a poder complementar els perfils de temperatura.

3.5.1 Mesures de la temperatura

A cada prova es mesurava la temperatura a 83 posicions del mòdul. La majoria de termoparells mesuren temperatures de superfícies però en alguns punts s'utilitzaven també termoparells de placa. Dins la bomba es mesurava també la temperatura de l'aire.

Els termoparells utilitzats eren del tipus K, amb un diàmetre de cable de 0.51 mm. Normalment es soldaven a la superfície que calia mesurar perquè hi hagués un bon contacte tèrmic.

Taula 3.4 Posicions de tots els termoparells per a la mesura de la temperatura al mòdul de proves.

Mesura número	Posició	Mesura	Tipus de termoparell
1-20	Dins el cilindre	Temperatura de l'acer	Tipus K, soldat
21-24	Exterior del cilindre	Temperatura d'exposició	Termòmetre de placa
25-29	Exterior de la paret NW	Temperatura de l'acer	Tipus K, soldat
30-45	Exterior al rack de canonades	Temperatura de l'acer	Tipus K, soldat
46	Exterior al rack de canonades	Temperatura d'exposició	Termòmetre de placa
47-53	Dins la bomba	Temperatura de l'acer	Tipus K, soldat
54	Dins de bomba	Temperatura de l'aire	Cable soldat de 0.25 mm
55-59	Exterior de la paret NE	Temperatura de l'acer	Tipus K, soldat
60-68	Exterior de la paret E	Temperatura de l'acer	Tipus K, soldat
69-71	A l'interior de la paret E	Temperatura d'exposició	Termòmetre de placa
72-77	Sobre les cubetes	Temperatura de l'acer	Tipus K, soldat
78-83	A l'exterior de la campana del mòdul.	Temperatura de l'acer.	Tipus K, soldat

Els termoparells de placa consisteixen en una caixa d'acer inoxidable (Inconel) de 100 mm x 100 mm x 15 mm, amb un termoparell soldat a la part interna de la cara frontal i tot ple d'aïllant resistent a la temperatura. Per tal d'aconseguir una emissivitat elevada (propera a 1.0) abans d'utilitzar-los per primera vegada s'escalfaven fins a 1000 °C. Amb aquest sistema el termòmetre enregistra la temperatura real (combinació de convecció i radiació neta) a la qual es troba sotmesa l'estructura.

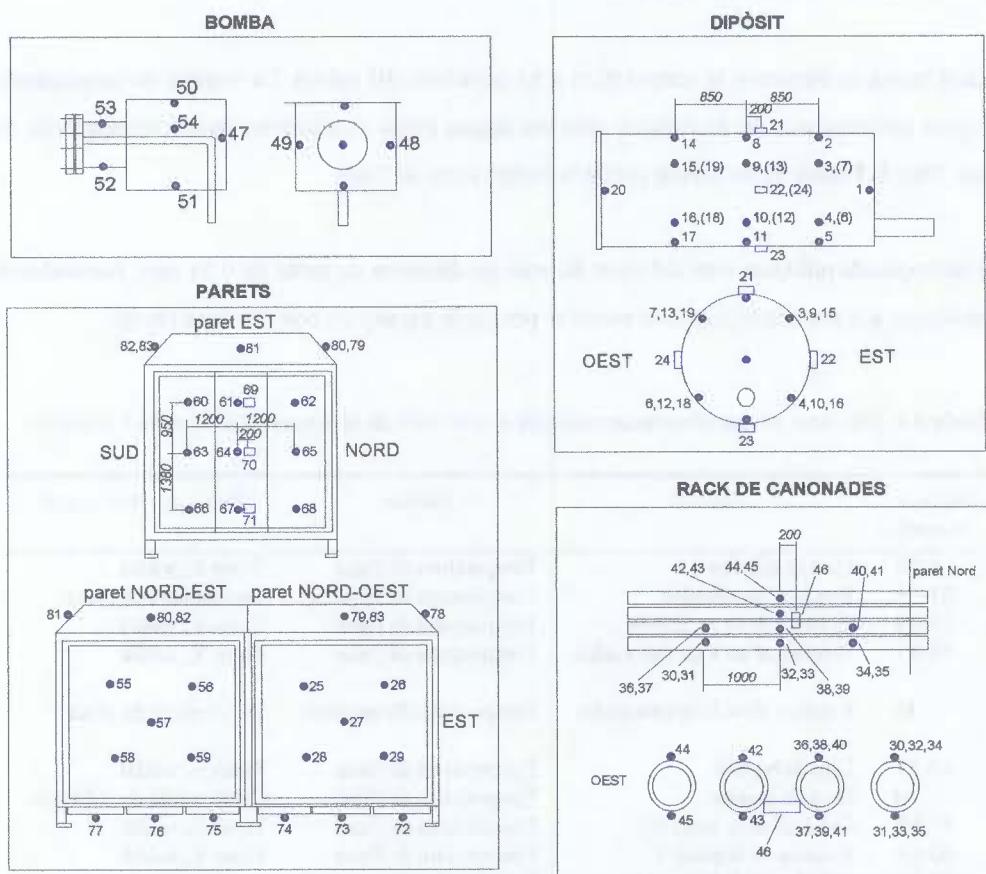


Figura 3.8 Posició dels termoparells a les diferents parts del mòdul de proves.

Totes les temperatures quedaven automàticament enregistrades en un Schlimberger ORION delta logger —anomenat ORION2—, en intervals de 6 segons. Les mesures s'iniciaven normalment 1 min abans de la ignició. A la taula 3.4 es detallen les posicions dels 83 punts de mesura (vegeu també la figura 3.8).

3.5.2 Altres mesures realitzades

La calor alliberada durant l'incendi es mesurava amb un calorímetre de gran capacitat (vegeu la figura 3.9). El funcionament d'aquest calorímetre es basa en el fet que la majoria de materials alliberen la mateixa quantitat de calor per unitat d'oxigen consumit —aproximadament 13 $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ d'oxigen.

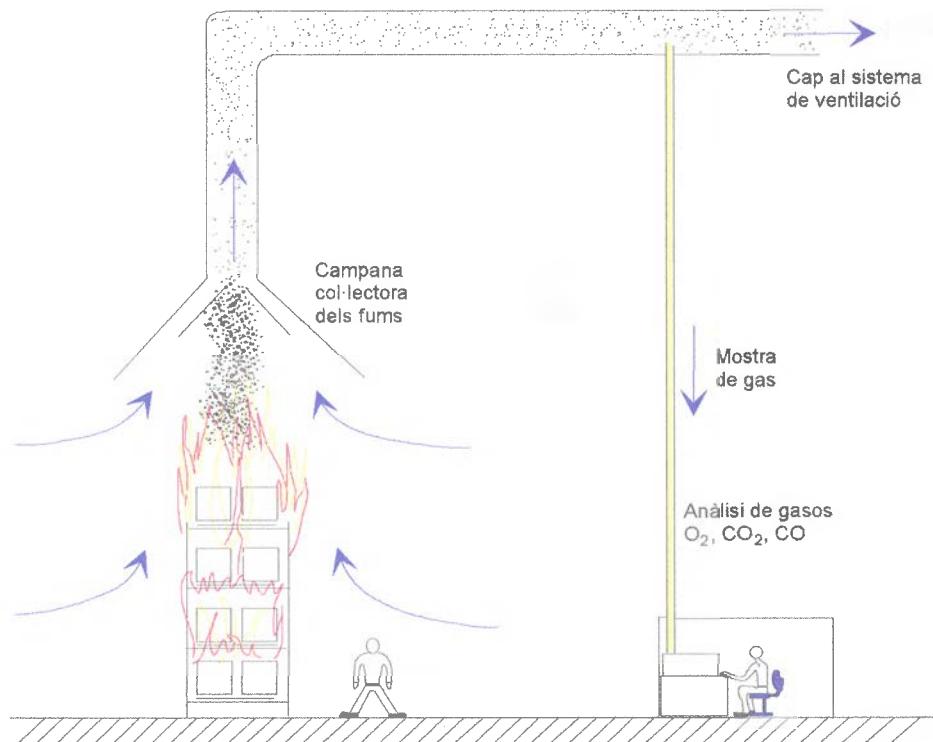


Figura 3.9 Esquema del calorímetre industrial de SP.

El calorímetre recollia tots els gasos de combustió a través de la campana situada damunt el mòdul de proves, en mesurava el contingut d'oxigen i el cabal per tal d'obtenir el consum d'oxigen per unitat de temps i per tant la calor total alliberada. També es mesuraven el contingut de CO₂ i CO, la qual cosa permet calcular la quantitat total d'aquests gasos que s'alliberen durant l'incendi.

El cabal de fums es determinava amb un sensor bi-direccional que mesurava la velocitat i amb un termoparell (protegit de la radiació) que en mesurava la temperatura. En un determinat punt del conducte de sortida dels gasos, es prenien mostres del fum i es portaven directament a l'analitzador de gasos. Aquest estava connectat a un registrador Schlumberger ORION delta logger — anomenat ORION1 —. Les dades es processaven constantment de manera que es podia veure també la part convectiva de la calor alliberada mentre s'estava realitzant la prova [DAHL92].

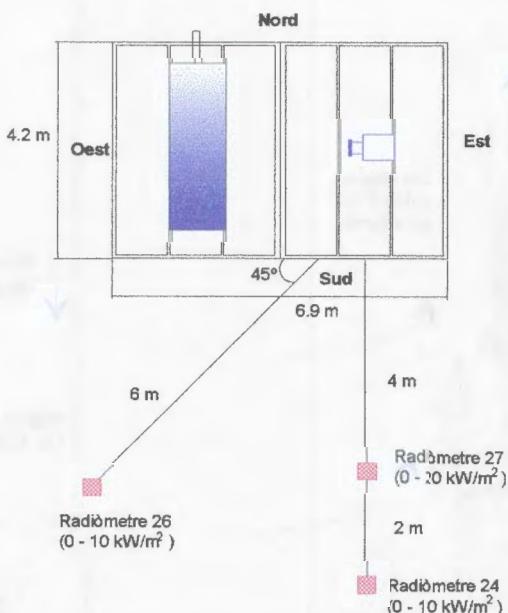


Figura 3.10 Posició dels radiòmetres respecte el mòdul.

Una altra de les mesures realitzades és la radiació. La radiació es mesurava en tres punts situats a la cara sud del mòdul (vegeu la figura 3.10), sempre en les mateixes posicions però encarats cap al centre de l'incendi, segons cada prova.

Els radiòmetres eren del tipus Medtherm, un treballant de 0-20 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ i els altres dos de 0-10 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$. Per tal de poder comparar el grau de control dels incendis, per a cada prova es calculà la "radiació relativa". Això es fa normalitzant el valor de radiació que s'obté just abans que s'iniciï l'extinció de l'incendi a 1.0.

El càlcul de la radiació relativa es fa a partir de la lectura del radiòmetre que treballa en la zona de 0-20 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$, que era el més proper a l'incendi.

El cabal d'aigua (o barreja) utilitzat pel sistema d'extinció es mesurava amb un cabalímetre Maxi-Mag de Fisher&Porter, que podia treballar entre 0-400 $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$ o 0-2000 $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$. Normalment es treballava en el primer rang.

Taula 3.5 Distribució dels punts de mesura connectats a l'ORIONI.

Mesura número	Mesura	Tipus d'aparell	Observacions
1	Temperatura	Termoparell tipus K	Conducte de sortida
8	Pressió dinàmica	Micromanòmetre F&P	Conducte de sortida
5	CO_2	Siemens Ultramat 22P	
6	CO	Siemens Ultramat 22P	
7	O_2	Siemens Oxymat 5E	
12	Cabal d'aigua/escuma	Manòmetre F&P 0-400 $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$	
14	Massa de combustible	Balança de 0-650 kg	
21	Pressió del combustible	Transductor de 0-10 bar	
24	Radiació	Medtherm 0-10 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$	6 m al sud de cubeta ECT
26	Radiació	Medtherm 0-10 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$	6 m al sud-oest de la unió dels dos submòduls
27	Radiació	Medtherm 0-20 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$	4 m al sud de cubeta ECT
31	Pressió d'aigua/escuma	Transductor de 0-10 bar	Anomenada P1

La pressió es mesurava just després del cabalímetre (vegeu la figura 3.3) mitjançant un transductor de pressió amb un rang de treball entre 0-10 bar. En els casos en els quals el combustible es suministrava a pressió, aleshores també es mesuraven el cabal i la pressió.

Totes aquestes mesures es registraven a l'ORION1 automàticament a intervals d'aproximadament 1.2 segons. Les mesures s'iniciaven aproximadament un minut abans de la ignició. A la taula 3.5 es resumeixen totes aquestes mesures.

3.6 Descripció de les proves realitzades

L'objectiu principal de les proves dutes a terme era l'obtenció de dades que permetessin validar estudis de modelització teòrica o semi-teòrica del fenomen.

Les variables considerades són les següents (entre parèntesis es donen les abreviacions utilitzades en les taules):

- **Tipus d'incendi**

- Bassals de foc (PF)
- Incendis de dolls de líquid (LJF)
- Incendis de dolls de gas (GJF)
- Incendis de dolls de líquid procedents de brida (FLJF)
- Incendis en moviment (3DF)

- **Tipus de combustible**

- Hexà (HX): Representatiu dels hidrocarburs lleugers
- Heptà (HP): Representatiu dels hidrocarburs de volatilitat mitjana
- Querosè (KE): Representatiu dels hidrocarburs pesants
- Propà (LPG): Pels incendis de dolls de gas

- **Tipus de ruixadors i polvoritzadors**

- Ruixador SPK0
- Ruixador SPK1
- Polvoritzador SPY0

- **Nombrer i posició dels ruixadors/polvoritzadors**

- **Condicions d'operació del sistema d'extinció**

- Temperatura de l'aigua (solució escumògena): temperatura normal, $20\pm1^{\circ}\text{C}$ (NT); temperatura elevada, $40\pm1^{\circ}\text{C}$ (HT)
- Pressió de l'aigua (solució escumògena): Normal (NP), baixa (LP) i alta (HP)

- **Temps previ a l'extinció**

- 30 s

- 60 s

A continuació es detallen les proves realitzades amb bassals de foc.

Bassals de foc de 4 m² (Proves nº 1 a nº 19)

Bassals de foc a les cubetes CCE, CIE, CCO i CEE utilitzant com a combustibles HX, HE i KE, amb i sense escuma, variant el temps previ a l'extinció i el nombre, tipus i posició dels ruixadors així com el cabal d'aplicació i la pressió. La taula 3.6 resumeix les característiques d'aquests 19 tests i els resultats més immediats obtinguts.

Taula 3.6 Resum de les característiques de les 19 primeres proves.

Prova nº	Cubeta	Comb.	Ruixador polvoritzador	Factor K	Cabal aplicació (l min ⁻¹ .m ⁻²)	Cabal total (l min ⁻¹)	Pressió (bar)	Temps de preignició (s)
1	ECT	HE	2 SPK0/125°	58.8	10.2	176	2.2	30
2	ECT	HE	1 SPK0/125°	80	10.2	132	2.7	30
3	ECT	HE	1 SPK1/90°	82.6	10.2	132	2.6	30
4	EIT	HE	1 SPK1/90°	82.6	10.2	132	2.6	30
5	EIT	HE	1 SPK0/125°	80	10.2	132	2.7	30
6	ECT	HE	1 SPK0/125°	58.8	10.2	132	5.0	30
7	ECT	HE	1 SPK0/125°	58.8	6.5	84	2.0	30
8	ECT	HE	1 SPK0/125°	58.8	6.5	84	2.0	30
9	ECT	HX	1 SPK0/125°	80	10.2	132	2.7	30
10	ECT	HE	1 SPK0/125°	80	10.2	132	2.7	90
11	ECT	HE	1 SPK0/125°	80	10.2	132	2.7	30
12	WCT	HX	2 SPK0/125°	80	14.2	246	2.4	60
13	WCT	HX	2 SPK0/125°	80	14.2+	296	2.4	60
			1 SPY0/90°	24.4				
14	WCT	HX	2 SPK0/125°	80	14.2+	296	2.4	60
			1 SPY0/90°	24.4				
15	WCT	HX	2 SPK0/125°	80	14.2	246	2.4	60
16	EET	HE	1 SPK0/90°	58.8	10.2	95	2.6	30
17	EET	HE	1 SPY0/90°	55.1	10.2	95	3.0	30
18	EET	HE	1 SPY0/90°	55.1	10.2	95	3.0	30
19	EET	HE	1 SPK0/90°	58.8	10.2	95	2.6	30

Bassals de foc en superfícies grans (Proves nº 88 a nº 92)

En aquest cas s'utilitzen 3 cubetes alhora, de manera que l'àrea del bassal sigui de 12 m² (vegeu la taula 3.7).

Taula 3.7 Resum de les característiques de les proves 88 a 92.

Prova nº	Cubeta	Ruixador polvoritzador	Factor K	Cabal aplicació (l·min ⁻¹ ·m ⁻²)	Cabal total (l·min ⁻¹)	Pressió (bar)	Temps de preignició (s)
88	WET-WIT	2 SPK0/125° 1 SPY0/90°	80 24.4	14.2+	296	2.4	30
89	WET-WIT	2 SPK1/125° 1 SPY0/90°	82.6	14.2+	296	2.2	30
90	WET-WIT	2 SPK0/125°	34	6.5	112	2.7	60
91	WET-WIT	2 SPK1/125°	32	6.5	112	3.1	60
92	WIT-ECT	2 SPK0/125° 1+1SPY0/90°	58.8 24.4	6.5+	268	2.0	60

A l'Annex-I es poden trobar les dades referents a la resta de proves realitzades, corresponents a dolls de líquid, dolls de líquid en brides, dolls de gas, dolls de líquid incident sobre el rack de canonades i sobre el dipòsit i incendis en moviment.

3.7 Resultats experimentals

De l'experimentació duta a terme en les instal·lacions d'Itàlia i Suècia se'n seleccionà la part més interessant per al seu tractament en el present treball. Els resultats experimentals obtinguts a Itàlia, que foren en part la base per a l'experimentació efectuada a Borås, foren deixats de banda ja que aquesta segona fase experimental presentava el major interès de la gran escala a la que es treballà.

Aquesta tesi s'ha basat doncs en els incendis de bassals de 12 m² i 4 m² de superfície dels diferents combustibles: en el desenvolupament de l'incendi, en la seva acció sobre l'equipament (dipòsit) i en la seva extinció mitjançant l'aplicació d'aigua/escuma.

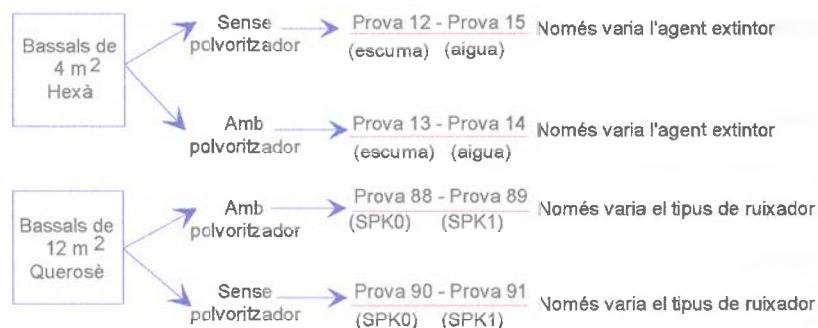
CAPÍTOL 4. DESCRIPCIÓ I ANÀLISI DE RESULTATS

CAPÍTOL 4. DESCRIPCIÓ I ANÀLISI DE RESULTATS

4.1 Introducció

Per als bassals de foc sota el dipòsit es varen dur a terme vuit proves, quatre amb un bassal de 4 m² i utilitzant com a combustible hexà (provees 12, 13, 14 i 15) i, quatre més amb un bassal de 12 m² i utilitzant com a combustible querosè (provees 88, 89, 90 i 91).

En cada una de les proves cal distingir dues etapes clarament diferenciades. La primera etapa és de desenvolupament de l'incendi i dura 30 o 60 s, dependent de la prova; la segona etapa s'inicia a partir del moment en què s'activen els sistemes d'extinció. Pel que fa a la primera etapa, les provees 12, 13, 14 i 15 són exactament iguals entre elles i també ho són les provees 88, 89, 90 i 91. En canvi, durant la segona etapa:



Per a cada mida de bassal en dos de les proves s'utilitzà un polvoritzador que es situà just a sota del dipòsit, per millorar-ne la refrigeració. A més en el cas dels bassals de 4 m², en dues de les proves (12 i 13) s'utilitzà com a agent extintor una barreja aigua/escuma mentre que en les altres

dues (14 i 15) s'utilitzà aigua sola. Això fa que durant la segona fase les quatre proves siguin diferents. En els bassals de 12 m² el que varia no és l'agent extintor sinó el tipus de ruixador, però això també fa que durant la segona fase aquestes quatre proves també siguin diferents.

En aquest capítol s'analitzen els resultats obtinguts en aquestes vuit proves pel que fa a reproductibilitat, estat estacionari, calor total i de convecció emesa per l'incendi i evolució de les temperatures als diferents punts del dipòsit, tant durant el desenvolupament de l'incendi com durant la fase d'extinció.

4.2 Reproductibilitat de les proves i estat estacionari

Per tal de comprovar la reproductibilitat de les proves i, per tant, assegurar que són comparables, s'ha representat en un gràfic de l'evolució de la temperatura del dipòsit en funció del temps, per a cada termoparell, conjuntament per les proves 12, 13, 14 i 15 i per les proves 88, 89, 90 i 91, durant els primers 60 s (en els quals les quatre proves de cada grup presenten les mateixes característiques exceptuant la 88 i la 89 que tenen un període de preencesa de 30 s, a partir del qual s'activava el sistema d'extinció). A les figures 4.1.a i 4.1.b es poden veure els gràfics corresponents al termoparell núm. 5.

En general, el comportament observat en el conjunt de tots els termoparells mostra que les proves 12, 13 i 14 són pràcticament sempre idèntiques. La prova núm. 15 segueix el mateix comportament que les altres tres (de tipus lineal) però globalment presenta valors de temperatura lleugerament més grans (vegeu la figura 4.2).

Quant als bassals de 12 m² —prove 88, 89, 90 i 91— la fase de desenvolupament de l'incendi era de 30 s per les dues primeres proves (amb l'activació immediata del sistema d'extinció) i de 60 s per les altres dues; això fa que la temperatura registrada en les proves 88 i 89 sigui pràcticament constant després dels primers 30 s.

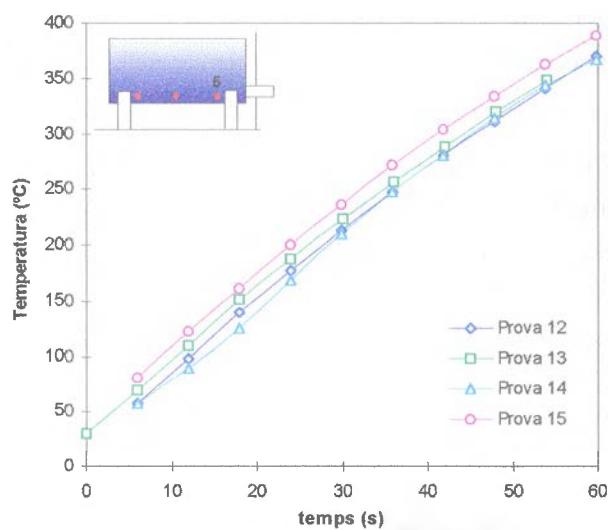


Figura 4.1.a Evolució de la temperatura del dipòsit segons el temps en la posició del termoparell núm. 5. Proves 12, 13, 14 i 15 (4 m^2 , hexà).

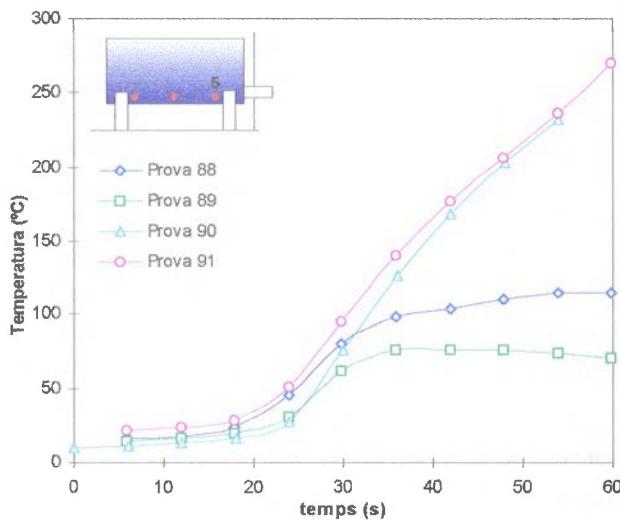


Figura 4.1.b Evolució de la temperatura del dipòsit segons el temps en la posició del termoparell núm. 5. Proves 88, 89, 90 i 91 (12 m^2 , querose). Pot observar-se com, en bassals de diàmetre gran, l'evolució de l'incendi presenta una certa dispersió en la fase inicial.

A la figura 4.1.b es pot observar que la forma de les corbes és la mateixa per les quatre proves, havent-se comprovat que també ho és en cada un dels termoparells; és, però, força diferent de la que mostraven les proves 12, 13, 14 i 15. En aquest cas, en lloc de tenir una forma lineal aquesta és aproximadament parabòlica. Això és degut a què el desenvolupament de l'incendi per damunt de la superfície del bassal és més lent i això es reflecteix en un augment de la temperatura dels termoparells molt més pausada a l'inici (vegeu la figura 4.1.b). Després de la fase inicial els 30 s restants —i únicament per les proves 90 i 91— són pràcticament idèntics quant a la forma però s'observa una petita desviació en els valors obtinguts.

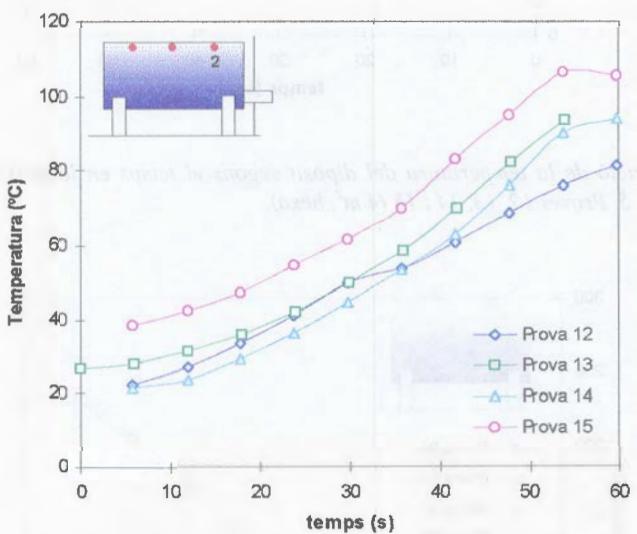


Figura 4.2 Evolució de la temperatura segons el temps pel termoparell núm. 2 i per les proves núm. 12, 13, 14 i 15 (4 m^2 , hexà).

En qualsevol cas, en ambdós casos les corbes mostren la reproductibilitat de les proves i per tant el fet que siguin comparables.

Pel que fa a l'estat estacionari, en les proves 12, 13, 14 i 15 s'assoleix aproximadament entre els 30 i els 60 s; pot observar-se en la figura 4.2 com les temperatures registrades en les diferents proves arriben a adoptar valors aproximadament constants als 60 s d'iniciar-se el foc. Aquest fet

Encara que la figura 4.4.a (prova núm. 88) sembla mostrar que la radiació deixi d'augmentar al voltant de 30 s, això és degut a que just en aquest instant es va activar el sistema d'extinció, si no hauria continuat augmentant com ho fan les proves 90 i 91 (vegeu la figura 4.4.b); el mateix pot dir-se de la prova núm. 89.

D'altra banda, de la figura 4.4.b no se'n pot pas deduir que la radiació deixi d'augmentar als 60s; això ens indica per tant que encara no s'ha arribat a l'estat estacionari, és a dir que el foc no està encara completament desenvolupat.

4.3 Calor total i de convecció emesa durant l'incendi

4.3.1 Calor total

La calor total i de convecció emeses durant cada una de les proves es mesuraven mitjançant un calorímetre adiabàtic, el qual permetia obtenir directament les corbes de calor segons el temps. La característica més destacable d'aquestes corbes és el canvi de pendent que s'hi pot observar al voltant de $t = 30$ s (vegeu la figura 4.5); a partir d'aquest punt la calor total alliberada continua augmentant, però d'una manera més pausada, fins el moment en què s'activa el sistema d'extinció (als 60 s); aleshores s'observa el màxim de la corba, coincidint amb la turbulència associada a aquesta activació. Posteriorment l'acció del sistema d'extinció s'imposa i la calor generada va disminuint ràpidament fins a ser pràcticament nul·la (extinció del foc).

La calor total emesa per un incendi es pot determinar teòricament a partir de la velocitat de combustió i de l'entalpia de combustió del combustible que estigui cremant. Per unitat de superfície i de temps, la calor despresa és doncs,

$$\dot{Q}_{tot}'' = \dot{m}'' \cdot \Delta H_c \quad (4.1)$$

on \dot{m}'' és la velocitat de combustió ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). Segons Hottel [MUDA84] la transferència de calor des del foc cap al bassal es pot representar per:

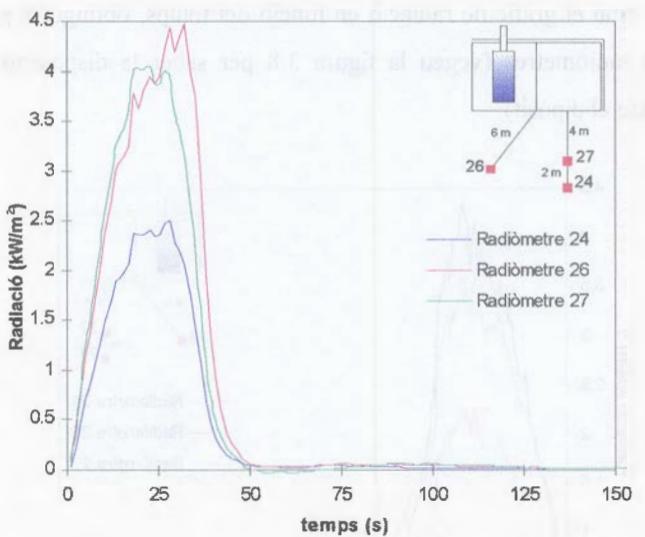


Figura 4.4.a Evolució de la radiació segons el temps per la prova núm. 88 (12 m², querosè).

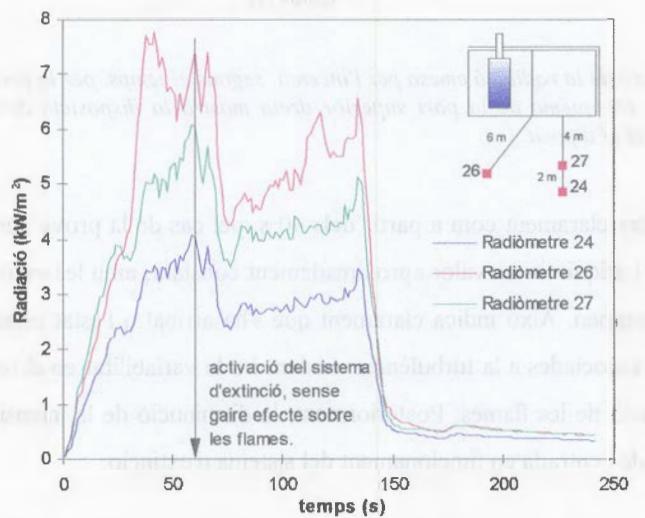


Figura 4.4.b Evolució de la radiació segons el temps per la prova núm. 91 (12 m², querosè).

La velocitat de combustió teòrica es determina dividint la calor que arriba al bassal per la calor necessària per a la vaporització del combustible (escalfament més vaporització). En el cas d'un bassal de dimensions infinites s'obté la velocitat de combustió màxima per unitat de superfície:

$$\dot{m}_{max}'' = \frac{\sigma F (T_f^4 - T_a^4)}{\Delta H_v + c_p (T_b - T_a)} \quad (4.4)$$

Aleshores, per un bassal de dimensions finites, la velocitat tindrà un valor menor que ve donat per la següent expressió:

$$\dot{m}'' = \dot{m}_{max}'' \left(1 - e^{-Kd} \right) \quad (4.5)$$

De l'expressió (4.4) se'n pot deduir que durant el règim transitori la velocitat de combustió variarà amb el temps, ja que la temperatura de la flama també ho fa. Per altra part, cal tenir en compte que aquesta varia també amb l'altura. No s'ha trobat a la bibliografia cap correlació que doni la variació de la temperatura de la flama durant el règim transitori, atès que aquest és un aspecte que fins ara no havia estat objecte de cap estudi detallat. Ha estat necessari doncs obtenir una expressió que permetés calcular aquesta variació. Amb les dades experimentals de què es disposa s'ha trobat que durant el règim transitori la temperatura de la flama segueix una correlació del tipus:

$$T_f(t, h) = \frac{t}{(b + a \cdot t)} + c \quad (4.6)$$

on a i b són dos coeficients que en principi depenen de l'altura i c és una constant (vegeu l'Annex I). Tot i que només es disposa de tres punts per a correlacionar a i b amb l'altura, sembla que dins la zona d'alçades en què ens trobem —entre zero i dos metres— els coeficients a i b varien linealment amb l'alçada (de forma general). En el cas particular dels bassals d'hexà

$$\frac{\dot{Q}}{(\pi d^2 / 4)} = \underbrace{\frac{4K_c}{d} (T_f - T_a)}_{\text{Calor per conducció}} + \underbrace{H(T_f - T_a)}_{\text{Calor per convecció}} + \underbrace{\sigma F (T_f^4 - T_a^4) (1 - e^{-Kd})}_{\text{Calor per radiació}} \quad (4.2)$$

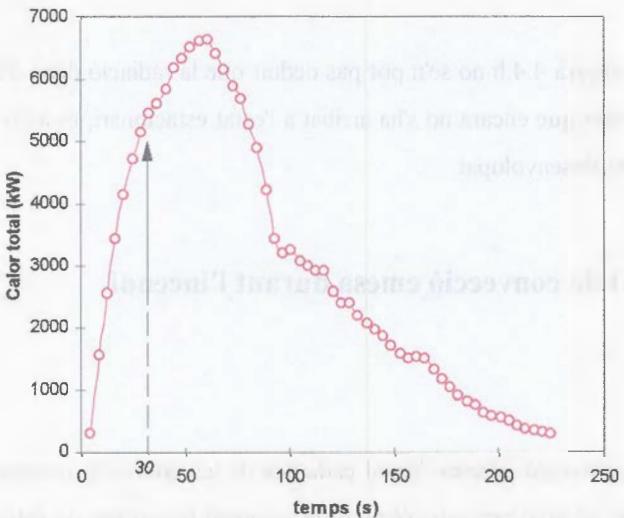


Figura 4.5 Evolució de la calor total emesa durant la prova núm. 13 (4 m^2 , hexà), segons el temps.

En aquesta expressió, el primer terme del segon membre representa la velocitat de transferència de calor per conducció des de la paret del bassal; és un efecte de contorn, important només per a bassals de pocs centímetres de diàmetre i completament negligible en els incendis aquí tractats. El segon terme és la calor transferida per convecció, significativa també només per a diàmetres petits. De Ris i Orloff [MUDA84] demostraren que per a la majoria de combustibles líquids la velocitat de combustió augmentava amb el diàmetre. Per a bassals de diàmetre superior a 1 m el terme de radiació és el que predomina, així es pot dir que en aquest cas:

$$\frac{\dot{Q}}{(\pi d^2 / 4)} = \sigma F (T_f^4 - T_a^4) (1 - e^{-Kd}) \quad (4.3)$$

del vapor combustible, molt més fred que les flames, protegeix considerablement la superfície del bassal de la radiació, cosa que afecta directament la velocitat de combustió) fan que el perfil de temperatura sigui considerablement diferent al suposat per Heskestad (aquest autor suposa que el perfil de temperatura és similar als corresponents a les alçades 60 mm i 510 mm, de la figura 4.6). A la figura 4.6 es poden veure alguns dels resultats obtinguts per Modak [MODA,81] on s'observa clarament el comportament de la temperatura de la flama en zones molt properes a la superfície del bassal.

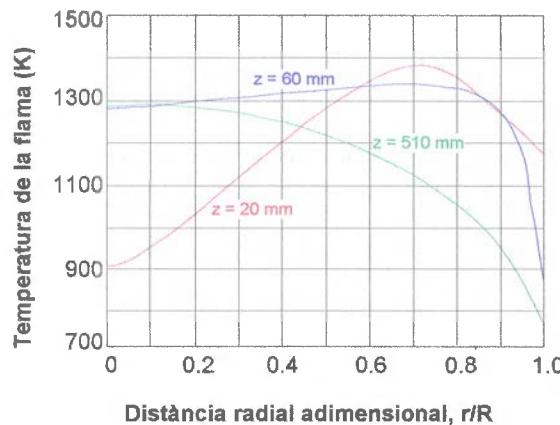


Figura 2.6 Variació radial de la temperatura de flama per a tres alçades diferents en un bassal de foc de PMMA de 0.73 m de diàmetre.

Segons aquests resultats, s'estima que l'error comès en determinar la temperatura mitjana de la flama just sobre el bassal, segons les observacions de Heskestad és de l'ordre del 20%, és a dir que en realitat el que es té és:

$$T_{mitjana} = 0.8 \cdot (0.75T_f + 72.5)$$

és a dir:

$$T_{mitjana} = 0.6 \cdot T_f + 58$$

de 4 m^2 a es manté aproximadament constant; s'obtenen els valors següents d'aquests paràmetres:

$$\begin{aligned}a &= 0,000851 \\b &= 0,0034 + 0,021 \cdot h \\c &= 290\end{aligned}$$

Com que no es disposa de dades experimentals de l'evolució de la temperatura de la flama just damunt del bassal ($h=0$), per a determinar-la es pot aplicar la correlació (4.6). Pel cas dels bassals d'hexà de 4 m^2 aquesta expressió adopta la forma següent:

$$T_f(t, h=0) = \frac{10^4 \cdot t}{(34 + 8,51 \cdot t)} + 290 \quad (4.7)$$

on el temps vé expressat en segons i la temperatura en graus Kelvin. Cal tenir present però que aquesta temperatura s'ha extrapolat per alçada zero —a partir d'una correlació obtinguda per alçades entre 0,72 i 1,92 m— i que a més correspon a la temperatura del centre de la flama, quan el que realment interessa és una temperatura mitjana per a tota la superfície del bassal. Per tal de corregir els errors que tot això pot comportar s'han tingut en compte els estudis fets per altres autors.

Segons Heskestad [SFPE,90] la temperatura de la flama a una determinada alçada no és constant sinó que disminueix a mesura que hom s'allunya del centre de la flama, essent a l'extrem més allunyat un 50% inferior (en termes d'increment de temperatura respecte la temperatura ambient, que en aquest cas és de l'ordre de 290 K). Així la temperatura mitjana de la flama per a una determinada altura es pot expressar:

$$T_{mitjana} = 0,75 \cdot T_f + 72,5$$

Les observacions de Heskestad no són del tot vàlides però, quan s'està molt proper a la superfície del bassal, ja que en aquest cas diversos fenòmens (entre ells el fet que la presència

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{real}''_{total}}{\dot{Q}_{teorica}''_{total}} = \frac{\text{Calor real alliberada en la combustió d'un bassal lliure}}{\text{Calor teòrica que s'alliberaria si la combustió fos completa}} \quad (4.10)$$

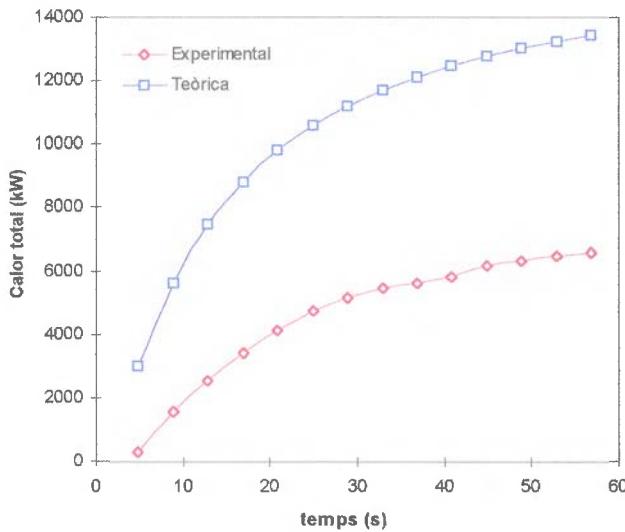


Figura 4.7 Evolució de la calor total, experimental i teòrica, segons el temps per la prova 13 (4 m², hexà).

Degut a les condicions en què s'ha dut a terme l'experimentació (acció del foc sobre un equip envoltat per aquest), s'introduceix un terme nou que s'anomenarà *factor d'obstaculització*; aquest factor correspon al quotient entre la calor real alliberada en la combustió d'un bassal amb un obstacle (ex. dipòsit) i la calor real alliberada en el mateix bassal sense obstacle. D'aquesta manera es té en compte la distorsió o alteració que l'obstacle provoca en l'incendi:

$$\xi = \frac{\dot{Q}_{real,obst.}''_{total}}{\dot{Q}_{real}''_{total}} = \frac{\text{Calor real alliberada en la combustió d'un bassal amb un obstacle}}{\text{Calor real alliberada en la combustió del mateix bassal sense obstacle}} \quad (4.11)$$

Aquesta és l'expressió que s'utilitzarà per estimar la temperatura mitjana de la flama a la superfície del bassal, evidentment els valors obtinguts s'han de prendre com a aproximacions al valor real ja que aquest és desconegut, però es poden considerar prou acurats pels càlculs que s'han de dur a terme. Introduint doncs aquesta expressió, juntament amb l'equació (4.7) específica per a l'hexà (o la que corresponguï en funció del combustible utilitzat) a l'equació (4.5) s'arriba a una expressió semiempírica que permet calcular la velocitat de combustió durant el règim transitori:

$$\dot{m}(t) = \frac{\sigma F}{\Delta H_v + c_p(T_b - T_a)} \left[\left(0,6 \left(\frac{t}{(b+a \cdot t)} + c \right) + 58 \right)^4 - T_a^4 \right] \cdot (1 - e^{-Kd}) \quad (4.8)$$

Aquesta equació permet alhora determinar semiempíricament la calor total teòrica alliberada durant el règim transitori en l'incendi d'un bassal. Com que per a la geometria d'aquest cas el factor de vista és la unitat, la calor total alliberada serà donada per la següent expressió,

$$\dot{Q}_{total}''_{teòrica} = \sigma (T_{mitjana}^4(t) - T_a^4) (1 - e^{-Kd}) \frac{\Delta H_c}{\Delta H_v + c_p(T_b - T_a)} \quad (4.9)$$

Durant un incendi, no tot el combustible evaporat arribarà a cremar i per tant aquesta calor teòrica serà la màxima possible, sempre superior a la calor real alliberada. A la figura 4.7 es pot veure la corba experimental de la calor total alliberada (correspondent a la prova núm. 13) i la corba teòrica calculada tal com s'ha descrit en els paràgrafs precedents.

En el context d'aquesta tesi cal fer una distinció entre dos rendiments diferents. S'entendrà per *rendiment de la combustió* en l'incendi d'un bassal, el quotient entre la calor real alliberada en la combustió d'un bassal lliure (no obstaculitzat) i la calor que s'alliberaria en el mateix bassal en el cas que la combustió fos completa,

En principi aquesta corba hauria de ser, o bé una línia completament horitzontal (en el cas que des de l'inici de la prova es notés l'efecte del dipòsit amb una influència constant), o bé una corba que comencés aproximadament a 100 i anés disminuint fins esdevenir constant a un valor determinat en el cas que a l'inici de la prova pràcticament no es notés l'efecte del dipòsit; de fet, en aquest cas el rendiment amb obstacle hauria de coincidir amb el rendiment sense obstacle i per tant ser de l'ordre del 92% [TEWA90]).

La raó per la qual el gràfic de la figura 4.8 no segueix, durant els 20 primers segons, cap dels dos comportaments exposats és que el mètode nou proposat (i en particular el càlcul de la temperatura de flama) tendeix a sobreestimar la temperatura de la flama en els primers moments; com que en el càlcul de la calor total la temperatura està elevada a la quarta potència, un error que pot ser petit en la determinació de la temperatura passa a ser molt gran una vegada aquesta és introduïda a l'equació pel càlcul de la calor total. A la figura 4.8, doncs, la part de la corba corresponent a l'inici de l'incendi no té cap sentit real; el rendiment amb obstacle ve determinat pel valor aproximadament constant obtingut a temps més elevats (48% en el cas de la figura 4.8).

Un altre terme que s'utilitzarà serà el que aquí s'anomena *relació d'obstaculització* i que fa referència al quocient entre la superfície projectada del dipòsit i la superfície del bassal,

$$R_{obst.} = \frac{S_{dipòsit}}{S_{bassal}} = \frac{\text{Superficie projectada del dipòsit}}{\text{Superficie del bassal}} \quad (4.13)$$

4.3.2 Efecte del dipòsit sobre la calor total alliberada en la combustió

A la figura 4.8 es pot observar que el rendiment de la combustió en presència del dipòsit és de l'ordre del 48%, força inferior als valors de rendiment de la combustió (sense dipòsit) que es poden trobar a la bibliografia.

El factor ξ adoptarà doncs com a valor màxim la unitat en aquells casos en els que la influència de l'obstacle sigui negligible, i valors decreixents a mesura que augmenti la magnitud de l'obstaculització. Finalment, es defineix el *rendiment de la combustió amb obstacle* com el producte del rendiment de la combustió pel factor d'obstaculització,

$$\eta_{obst.} = \eta \cdot \xi = \frac{\dot{Q}_{real,obst.}''_{total}}{\dot{Q}_{teòrica}''_{total}} \quad (4.12)$$

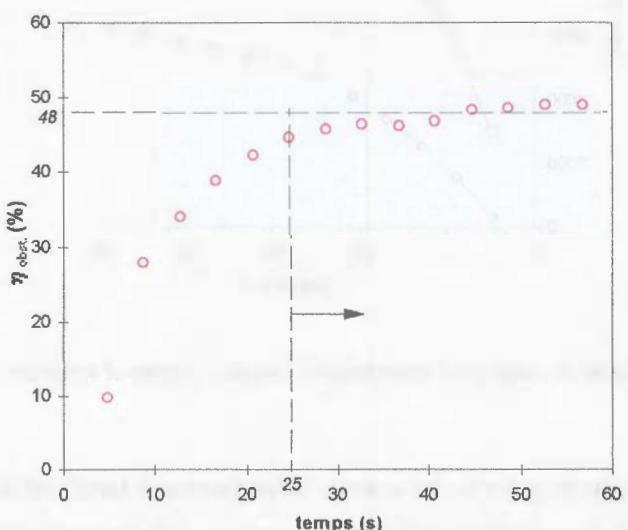


Figura 4.8 Evolució del rendiment de la combustió amb obstacle segons el temps per la prova núm. 13 (4 m^2 , hexà). Per a la $\dot{Q}_{total}''_{teòrica}$ s'ha pres el valor obtingut pel mètode nou aquí proposat.

És a dir, és la relació entre la calor real alliberada en la combustió d'un bassal obstaculitzat (per exemple per un equip) i la calor teòrica que s'alliberaria si la combustió fos completa i no obstaculitzada. Al gràfic de la figura 4.8 es pot veure com evoluciona el *rendiment de la combustió amb obstacle* ($\eta_{obst.}$) en funció del temps per la prova núm. 13.

veure que sense el dipòsit en, aproximadament, 40 segons s'arriba pràcticament a l'estat estacionari amb un rendiment de la combustió lleugerament inferior al 92 % (79% als 33 s).

Pel que fa al factor d'obstaculització, es pot veure a la figura 4.9.b que és un paràmetre que, tot i presentar una certa dispersió, es manté aproximadament constant en el temps (evidentment ha de ser així per a un sistema donat). En el cas dels bassals d'hexà de 4 m^2 és de l'ordre de 0,53 per una relació d'obstaculització del 90% (és a dir que el dipòsit fa "ombra" a un 90% de la superfície del bassal). El factor d'obstaculització ens dóna una idea de la disminució que experimentarà el rendiment de la combustió a causa de la presència del dipòsit.

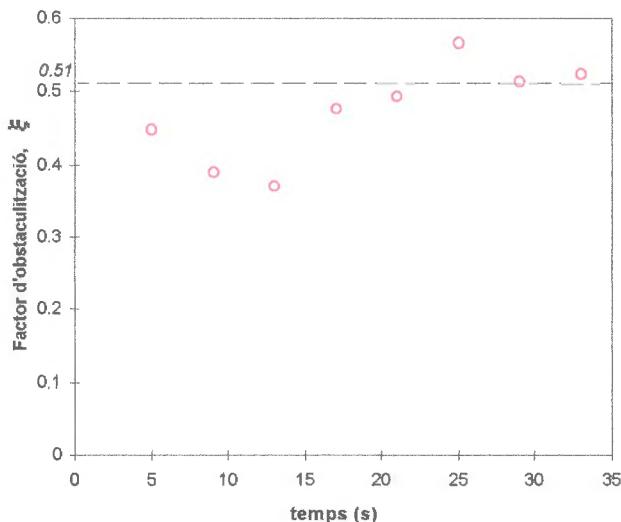


Figura 4.9.b Evolució del factor d'obstaculització segons el temps per un bassal d'hexà de 4 m^2 .

En el cas dels bassals de 12 m^2 , si es calcula la calor total teòrica alliberada en estat estacionari, a partir de la velocitat de combustió segons Babrauskas, s'obté el valor de 20.452 kW. Aplicant el nou mètode aquí proposat el resultat obtingut és, al cap de 60 s, de 18535 kW. La notable diferència que hi ha entre ambdós valors s'explica pel fet que 60 s no són suficients per a què els bassals de 12 m^2 arribin a l'estat estacionari, com ja s'ha vist a l'apartat 4.2; experimentalment, el

Per a bassals d'hexà, les dades obtingudes en la bibliografia [TEWA90] donen valors de l'ordre del 92% per al rendiment de combustió de bassals lliures. Aquesta disminució en el rendiment de la combustió s'ha d'atribuir a la presència del dipòsit, ja que en el cas d'incendis amb les mateixes dimensions i el mateix combustible, en els quals no hi ha dipòsit al mig —com és el cas de les proves núm. 9 i 13— els rendiments obtinguts són molt més elevats, de l'ordre dels valors citats a la bibliografia (vegeu la figura 4.9.a).

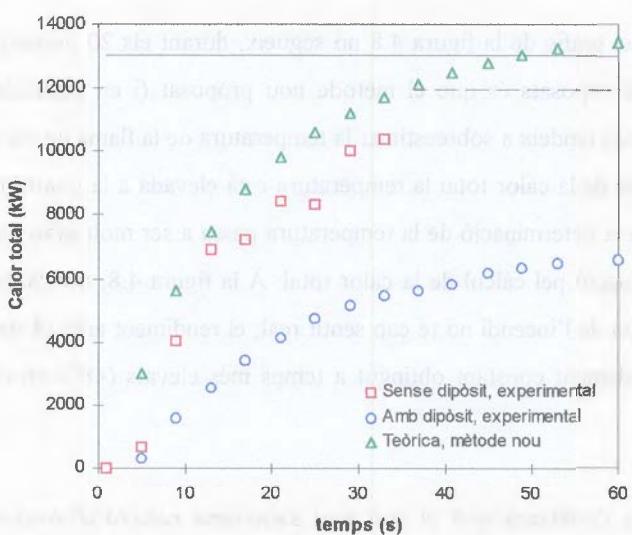


Figura 4.9.a Evolució de la calor total experimental segons el temps per les proves núm 9 i 13 (4 m^2 i hexà, sense i amb dipòsit). La línia horitzontal correspon al valor de la calor total teòrica en estat estacionari, calculada a partir de la velocitat de combustió proposada per Babrauskas; la línia discontinua correspon a la calor despresa amb un rendiment de combustió del 92 %

Si es calcula la calor total teòrica alliberada en estat estacionari, a partir de la velocitat de combustió determinada amb l'equació proposada per Babrauskas [BABR90], per a un bassal d'hexà de 4 m^2 s'obté una calor de 13.045 kW; aplicant el mètode proposat en els paràgrafs anteriors, vàlid fins i tot durant el transitori, s'obté un valor de 13.440 kW al cap de 60 s (és a dir una vegada assolit l'estat estacionari). La concordança d'aquests dos valors (un error del 3% respecte el valor més alt) posa de manifest la validesa d'aquest mètode. A la figura 4.9.a es pot

elevat; tot i que en aquest cas presenta més oscil·lacions que en els bassals de 4 m^2 la tendència és la de mantenir-se al voltant del 77%.

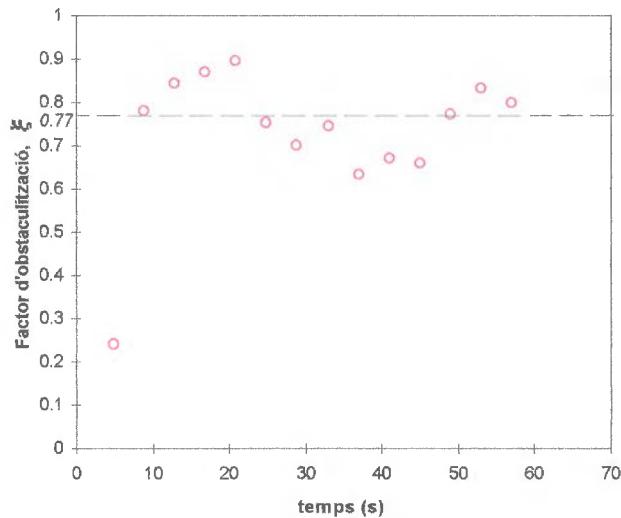


Figura 4.10.b Evolució del factor d'obstaculització segons el temps per un bassal de querosè de 12 m^2 .

4.3.3 Calor de convecció

La calor total emesa durant un incendi es distribueix bàsicament entre una part convectiva i una part radiativa:

$$\dot{Q}_{tot}'' = \dot{Q}_{conv}'' + \dot{Q}_{rad}'' \quad (4.14)$$

Ambdues components es poden determinar separadament i independentment de \dot{Q}_{tot}'' . La calor de radiació es pot determinar mitjançant la mesura amb radiòmetres. La calor emesa per convecció es pot determinar, per exemple, a partir del cabal i la temperatura dels gasos generats sabent que:

valor obtingut és de 11.100 kW. Això vol dir que el rendiment de la combustió amb obstacle és, al cap de 60 s, de l'ordre del 60% (utilitzant el valor de la calor teòrica per al règim transitori).

Igual que en el cas dels bassals de 4 m^2 , s'ha comparat amb un bassal d'iguals dimensions i amb el mateix combustible (prova 92) però sense dipòsit al mig (vegeu la figura 4.10). En aquest cas, després de 60 s el valor de la calor total emesa era d'uns 15.600 kW i per tant el rendiment de la combustió era del 85 % prenent el valor corresponent al règim transitori (si es pren com a referència el valor màxim, corresponent al règim estacionari, calculat segons l'equació de Babrauskas, el rendiment passa a ser del 77%).

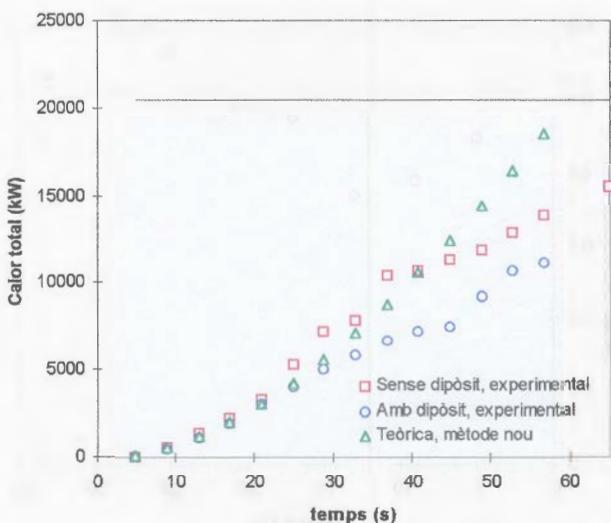


Figura 4.10.a Evolució de la calor total experimental segons el temps per les proves núm 91 i 92 (12 m^2 , querosè, amb i sense dipòsit). La línia horitzontal correspon al valor de la calor total teòrica en estat estacionari, calculada a partir de la velocitat de combustió proposada per Babrauskas.

En aquest cas l'efecte del dipòsit és menys important que en el cas dels bassals de 4 m^2 ja que la relació d'obstaculització és molt menor, 30%. Això queda reflectit també a la figura 4.10.b on es pot veure l'evolució del factor d'obstaculització segons el temps, en aquest cas és molt més

convecció s'ha d'atribuir al fet que els fums que emeten són molt més negres; això fa que l'incendi sigui menys iluminós i per tant que s'alliberi menys calor en forma de radiació. Tota la calor que no s'alliberi en forma de radiació ho farà en forma de convecció.

En aquest cas s'ha volgut comprovar, també, l'efecte que podia tenir el dipòsit en la fracció de calor alliberada en forma de convecció. A la figura 4.12.a i 4.12.b es pot veure com en el cas dels bassals de 4 m^2 , amb una relació d'obstaculització del 90%, la fracció de calor alliberada en forma de convecció és de l'ordre d'un 20% superior a la que s'allibera en bassals amb una relació d'obstaculització del 0% (sense cap obstacle).

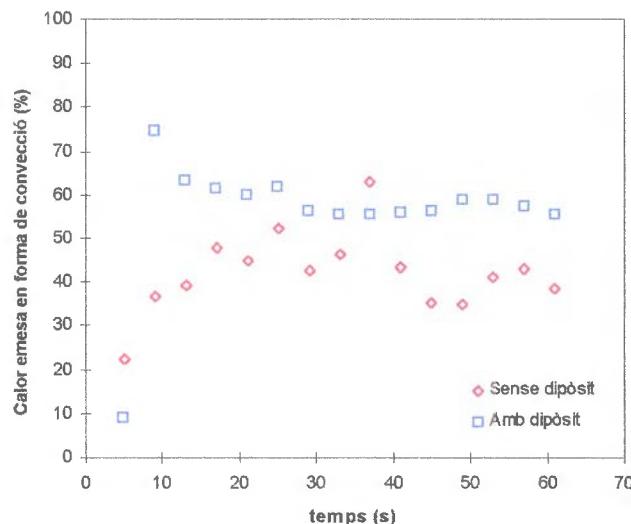


Figura 4.12.a Evolució de la calor emesa en forma de convecció segons el temps per les proves núm. 9 i 13. (4 m^2 , hexà, sense i amb dipòsit).

En canvi per a relacions d'obstaculització del 30% (vegeu la figura 4.12.b) i pel cas del querosè, no s'aprecia cap diferència respecte el bassal sense dipòsit. Cal dir que en ambdós casos les dades més representatives són les que hi ha a partir de 30 s, doncs la fase inicial presenta moltes fluctuacions degut a que l'incendi tot just està en el seu inici i les dades que apareixen s'ha de considerar que no tenen cap sentit físic.

$$\dot{Q}_{conv} = \dot{m}_{fums} \cdot c_{p,fums} \cdot \Delta T_{fums} \quad (4.15)$$

Durant les proves realitzades aquestes mesures es feien en el calorímetre i eren processades donant directament els valors de \dot{Q}_{conv} . A títol d'exemple a la figura 4.11 es pot veure la corba de la calor de convecció emesa durant la prova núm. 14. La tendència és semblant a l'observada en l'evolució de la calor total despesa: un progressiu increment en la calor generada per convecció, amb un fort pendent durant els primers 30 segons; a continuació un increment més suau —amb una certa dispersió deguda a la turbulència i irregularitat del foc— fins a assolir el valor màxim als 60 segons; posteriorment, una forta disminució originada per l'entrada en acció del sistema d'extinció.

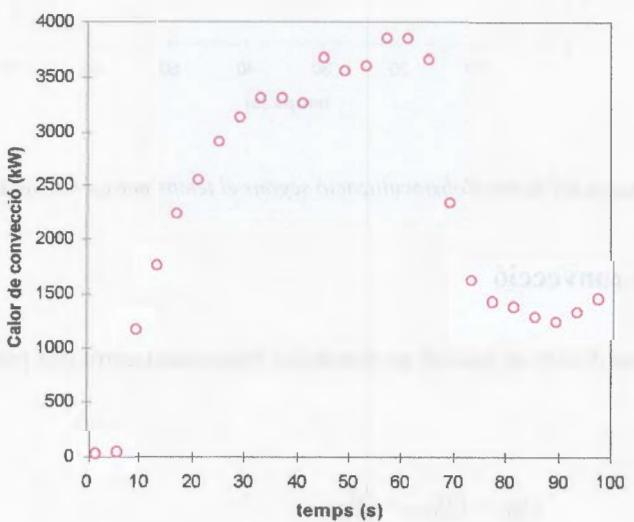


Figura 4.11 Evolució de la calor de convecció emesa segons el temps, durant la prova núm. 14 (4 m^2 , hexà).

De les dades obtingudes se'n pot deduir que pels incendis d'hexà (correspondents als bassals de 4 m^2) la calor emesa per convecció representa de l'ordre del 57% de la calor total. En el cas del querosè, només es disposa de dades per les proves 90 i 91 però donen uns valors de l'ordre del 65% de la calor total. El fet que els incendis de querosè alliberin més calor en forma de

És clar que, donat que la temperatura de les flames varia amb l'alçada respecte el bassal, també ho farà la temperatura als diferents punts del dipòsit. Per tant, en principi, sembla evident que al fons del dipòsit la temperatura ha de ser més elevada que no a la part superior. D'altra banda, atesa la simetria del dipòsit i de l'incendi, els punts simètrics situats a una mateixa alçada hauran de presentar valors de temperatura semblants (bé que aquí és d'esperar una certa influència de la asimetria del foc deguda a l'aparició de vent).

4.4.1 Evolució de les temperatures durant el primer minut

L'anàlisi de les gràfiques de l'evolució de la temperatura als diferents punts del dipòsit segons el temps permet —en la majoria dels casos, com ja es veurà— distingir 5 zones diferents, on cada canvi de pendent de la corba representa la transició d'una zona a una altra.

La primera fase correspon al desenvolupament de l'incendi i dura —excepte en les proves 88 i 89— 1 minut. Durant aquest primer minut es pot veure que la temperatura a qualsevol punt del dipòsit augmenta linealment amb el temps. El pendent de la línia varia segons la posició on es faci la mesura i depenen sobretot del grau d'incidència que tingui la flama en aquell punt. En un minut, al fons del dipòsit, la temperatura passa de la condició ambient (vegeu la figura 4.13) a valors superiors als 350 °C, mentre que als laterals inferiors la temperatura no supera els 250 °C i a la part superior la temperatura màxima és de 125 °C. Aquests valors es repeteixen per les proves 12, 13, 14 i 15.

En canvi per les proves 90 i 91, que corresponen als bassals de 12 m², s'observa un lleuger increment en aquests valors màxims i menys diferència entre els diferents punts del dipòsit; al ser més gran, l'incendi arriba de manera molt més uniforme a tots els punts. Així, la part inferior del dipòsit presenta un valor màxim de 350 °C, i els laterals de la part inferior i els punts de la part superior assoleixen valors màxims de l'ordre de 300 °C.

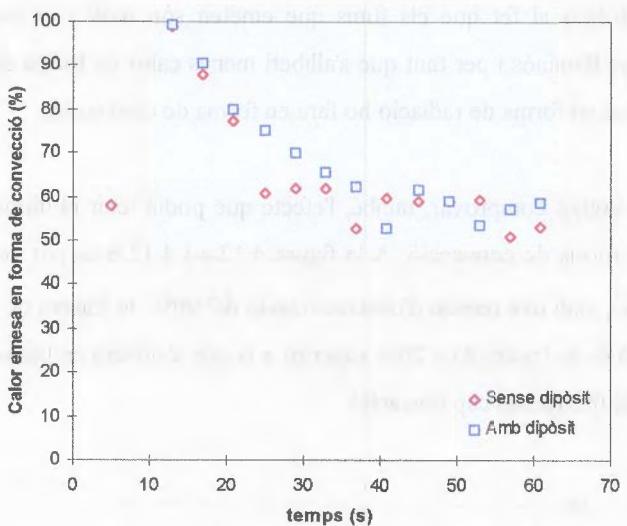


Figura 4.12.b Evolució de la calor emesa en forma de convecció segons el temps per les proves núm. 91 i 92 (12 m^2 , querosè, amb i sense dipòsit).

El més remarcable de la figura 4.12.a és que segons dades obtingudes de la bibliografia [TEWA90] per a bassals d'hexà la calor de convecció representa el 61% de la calor total mentre que el valor obtingut aquí és de l'ordre del 45% per a bassals sense obstacles i del 55% per a bassals amb obstacles. El valor del bassal amb obstacle s'acosta doncs força més al valor de Tewarson; cal tenir en compte però que aquest autor (que el dóna per a bassals sense obstacles) experimentà amb incendis de dimensions molt menors (de l'ordre d' 1 m^2), pel que probablement la comparació entre ambdós conjunts de dades no té gaire sentit. D'altra banda, per a bassals de més grandària els tres valors (bibliografia/bassal amb dipòsit/bassal sense dipòsit) coïncideixen amb valors al voltant del 65%.

4.4 Evolució de la temperatura a les parets del dipòsit

En aquest apartat s'analitzen les temperatures del dipòsit, tant durant la fase de desenvolupament de l'incendi com durant la fase d'extinció.

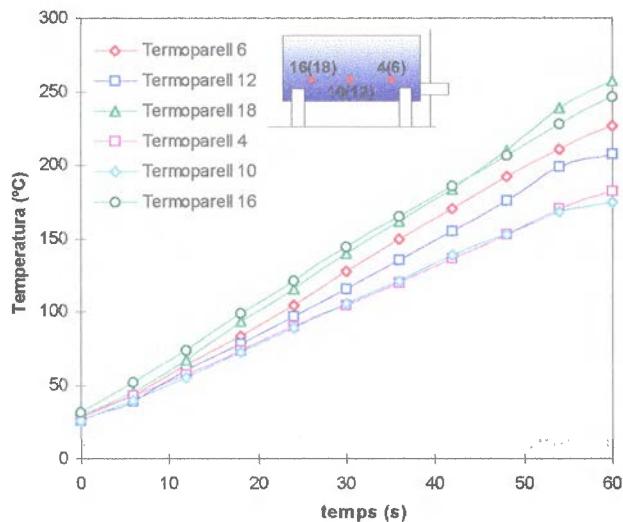


Figura 4.13.c Evolució de la temperatura del dipòsit durant el primer minut per la prova núm. 13 (4 m^2 , hexà). Laterals superiors del dipòsit.

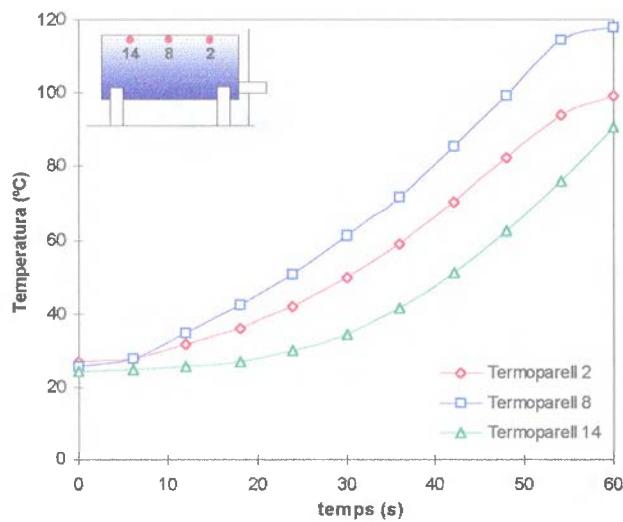


Figura 4.13.d Evolució de la temperatura del dipòsit durant el primer minut per la prova núm. 13 (4 m^2 , hexà). Part superior del dipòsit. (per a més detall sobre la posició dels termoparells del dipòsit vegeu la figura 3.6 al capítol 3).

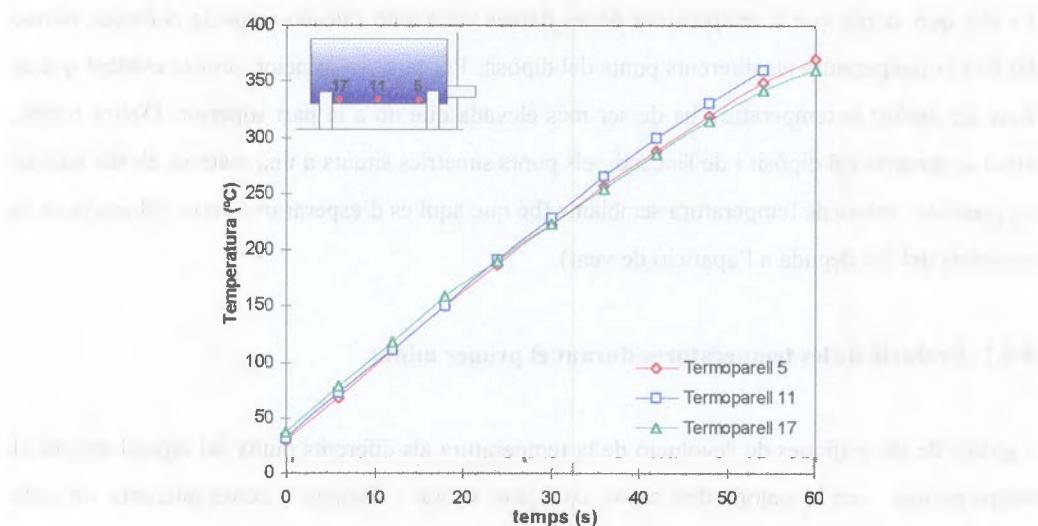


Figura 4.13.a Evolució de la temperatura del dipòsit durant el primer minut per la prova núm. 13 (4 m^2 , hexà). Part inferior del dipòsit

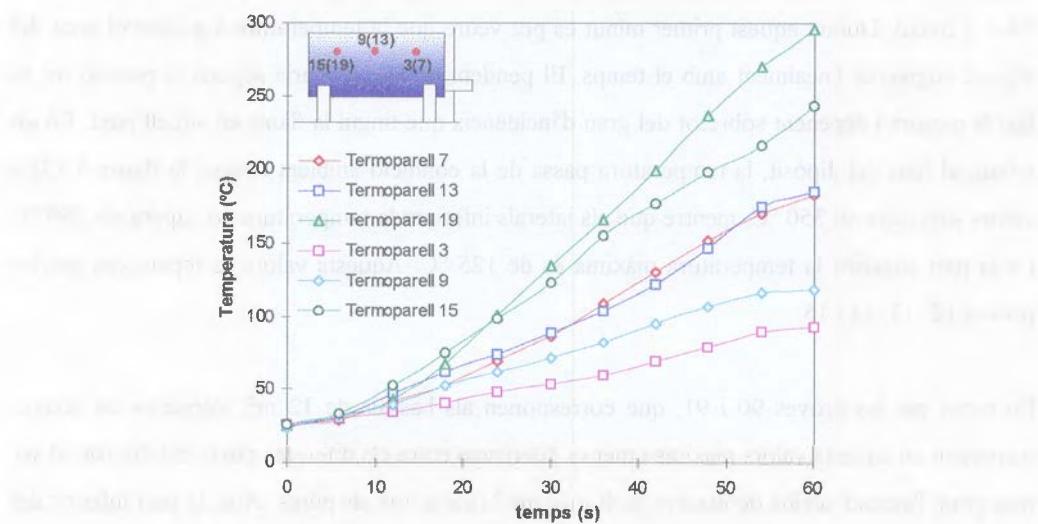


Figura 4.13.b Evolució de la temperatura del dipòsit durant el primer minut per la prova núm. 13 (4 m^2 , hexà). Laterals inferiors del dipòsit.

4.4.2 Evolució de les temperatures durant l'extinció de l'incendi

L'evolució del foc i del procés d'extinció s'ha representat esquemàticament a la figura 4.15, extreta d'una filmació. En els moments inicials el foc creix ràpidament, afectant ben aviat a tot el dipòsit. Un posterior creixement fa augmentar notablement l'altura de les flames que, com en tots els focs de dimensions una mica grans, mostren una forma variable. A mesura que creix l'altura de les flames augmenta la turbulència i la mobilitat de les mateixes.

A partir del moment en què s'activen els sistemes d'extinció s'observa un augment molt important de la turbulència de les flames, així com la presència d'un vent provinent de la banda oest del mòdul i que desplaça les flames cap al costat est (vegeu la figura 4.15). D'aquesta manera el costat oest del dipòsit es veu força menys afectat per les flames i els termoparells situats en aquest costat mostren temperatures més baixes que els del costat oposat. Això fa que hi hagi una disminució important en el pendent de les corbes en la representació de la temperatura enfront del temps. Alhora, a la cara est les temperatures continuen augmentant de manera important.

Arriba un moment en què la temperatura assoleix el seu valor màxim i a partir d'aquest instant comença a disminuir; en la representació de la temperatura en funció del temps, el pendent passa a ser negatiu. Aquesta situació correspon al moment en què comença l'efecte refrigerant de l'aigua, és a dir quan l'aigua arriba a la zona on s'està mesurant la temperatura. De tota manera, mentre continui rebent l'efecte de les flames la temperatura disminuirà però lentament.

Posteriorment, a mesura que el bassal va quedant cobert d'escuma, les flames es fan més petites i deixen d'incidir sobre el dipòsit. D'aquesta manera l'acció refrigerant de l'aigua és molt més gran i el pendent canvia sobtadament, disminuint molt la temperatura dels termoparells. Finalment, quan s'atura el sistema d'extinció/ refrigeració es pot observar novament un lleuger augment de la temperatura, degut a la radiació de les parets calentes del mòdul que hi ha al voltant del dipòsit.

A la figura 4.13 es pot veure com, dels quatre gràfics que hi ha, el corresponent als termoparells dels laterals de la part superior del dipòsit (vegeu la figura 4.13-c) presenta una dispersió força gran en els valors màxims de temperatura. Aquest fet es compleix també en els bassals de 12 m^2 . Això s'atribueix al fet que en realitat l'incendi no és exactament simètric degut a la presència de la resta del mòdul i a la pròpia estructura d'aquest. Els termoparells situats a la zona central del dipòsit i els que donen a la cara del mòdul es veuen sotmesos a les flames i a la calor més intensament que la resta (degut tant a l'efecte del vent com a la radiació emesa per l'estructura calenta del mòdul) i com a conseqüència la seva temperatura també és més gran.

L'evolució de la temperatura en els diferents punts del dipòsit en funció del temps pot veure's també a la figura 4.14. Aquest gràfic mostra com va augmentant aquesta variable en les diferents altures del dipòsit. Pot observar-se com a la part més baixa del dipòsit la temperatura augmenta molt en el temps. A mesura que augmenta l'alçada les temperatures enregistrades són cada vegada més baixes, tot i que la diferència més important és a la part més baixa del dipòsit mentre que les altres tres alçades no mostren una diferència tant important.

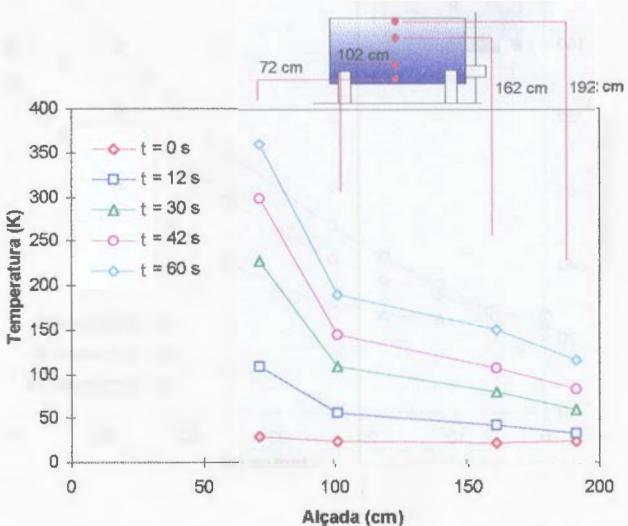


Figura 4.14 Evolució de la temperatura del dipòsit segons l'altura per a diferents instants de temps. Prova núm 13 (4 m^2 , hexà).

foc, es caracteritza per un ràpid creixement de la temperatura; en la representació de la temperatura enfront del temps s'observa una línia pràcticament recta de fort pendent. En la segona fase, que correspon a la situació de foc ja desenvolupat, la temperatura continua creixent però de forma ja no tan netament lineal, i a una velocitat menor i decreixent; en aquesta fase s'observa l'aparició de vent. La tercera fase s'inicia amb l'entrada en funcionament del sistema de refrigeració/extinció; amb la introducció en el sistema de la barreja aigua-escuma, la temperatura comença a disminuir —s'ha assolit doncs la temperatura màxima en la transició entre aquestes dues fases— de forma regular: la variació d'aquesta variable en funció del temps és aproximadament lineal.

En la quarta fase, l'acció de cobriment del bassal per l'escuma estable és prou forta per a què les flames no arribin al dipòsit (o, més concretament, al punt en el qual s'està mesurant la temperatura); en aquesta situació el balanç calorífic en la superfície del dipòsit està clarament influenciat pel mecanisme dominant de la refrigeració ocasionada per la pluja d'aigua/escuma (amb un feble component d'aportació calorífica per radiació), de manera que la temperatura descendeix abruptament de forma aproximadament lineal. Finalment, la darrera fase —correspondent a l'absència de flames— es caracteritza per una suau calefacció deguda a la radiació des de l'entorn ja esmentada.

La presència d'aquestes 5 fases només es pot observar en les gràfiques més completes, com en el cas de la figura 4.16. En altres mesures alguns dels passos intermedis poden no aparèixer, depenent de la situació del punt en el qual es mesura la temperatura. Això succeeix, per exemple, quan la incidència de les flames en un punt s'acaba en el mateix moment en què hi arriba l'aigua; aleshores la fase 3 desapareix i, just després del màxim, la temperatura baixa de cop (vegeu la figura 4.17.a).

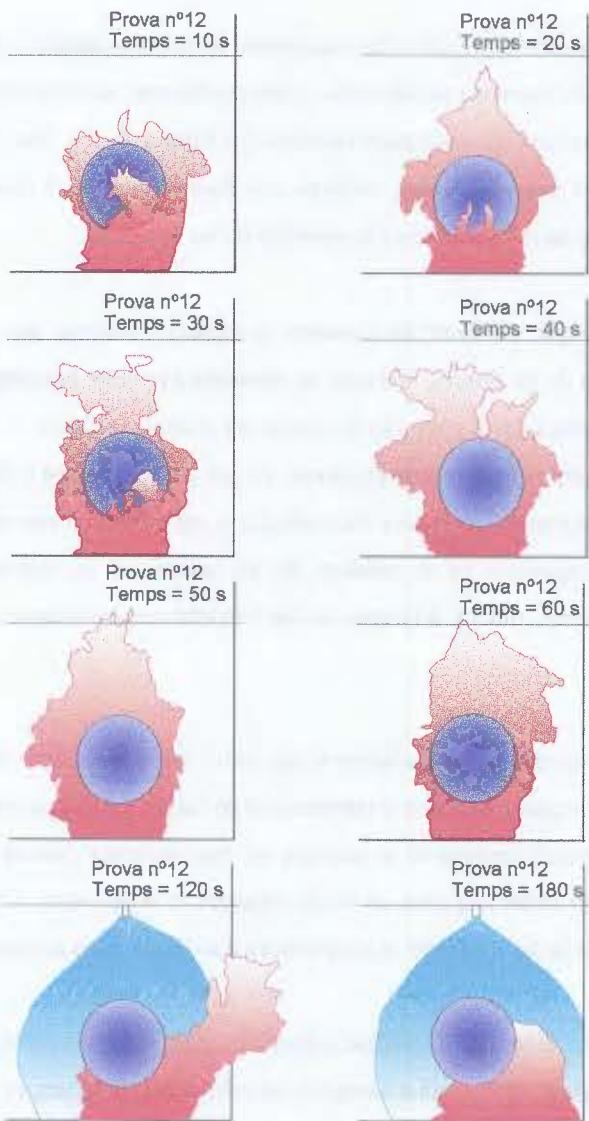


Figura 4.15 Forma de la flama en diferents instants , durant la prova núm. 12 (4 m^2 , hexà).

El procés descrit estableix doncs de manera força clara l'existència de cinc fases netament diferenciades (vegeu la figura 4.16). La primera, corresponent a l'inici i desenvolupament del

Aquesta situació correspondria, per a tot el sistema sotmès al foc (en el present cas, tot el dipòsit), a una extinció immediata de l'incendi. Aquest, que seria el cas ideal des del punt de vista de control de l'emergència, en la pràctica respon a unes condicions que només poden complir-se en alguns punts de la instal.lació. En general, doncs, cal suposar que una bona part d'aquesta continuarà rebent una notable aportació de calor durant un cert temps.

D'altra banda, en la zona inferior del dipòsit s'observa la incidència de la flama sobre el dipòsit durant pràcticament tota la prova; per altra part, en aquesta zona l'aigua no arriba mai a banyar la superfície del dipòsit (excepte en el cas en què s'hi ha instal.lat un polvoritzador). Això fa que els canvis de pendent siguin molt més suaus i que les temperatures mantinguin valors molt elevats fins al final de l'experiment (vegeu la figura 4.17.b).

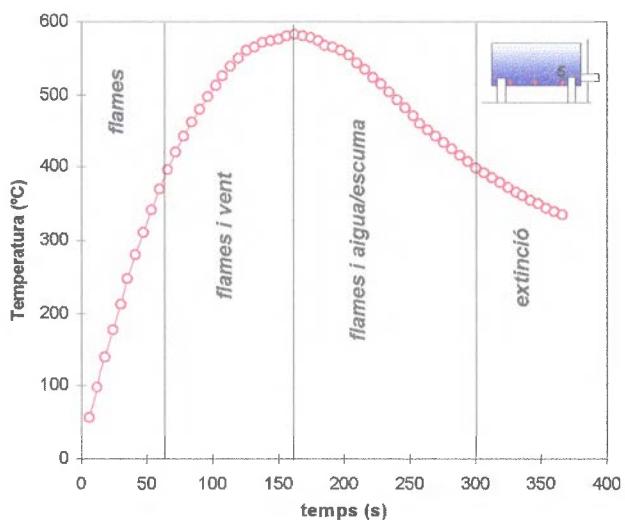


Figura 4.17.b Evolució de la temperatura segons el temps per la prova núm. 12 (4 m^2 , hexà). Termoparell núm. 5

Per les proves en què s'utilitzà únicament aigua com a agent extintor (provees 14 i 15) les corbes són similars, tot i que l'existència de les diferents fases no és tan clara, sobretot pel fet que les flames no s'arriben a extingir i fins i tot resulta difícil de controlar-les (vegeu la figura 4.18). En

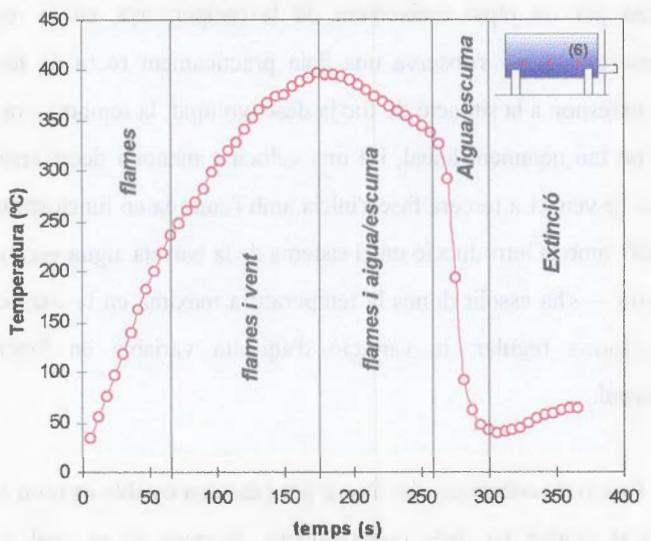


Figura 4.16 Evolució de la temperatura segons el temps pel termoparell núm. 6 i la prova núm. 12 (4 m^2 , hexà).

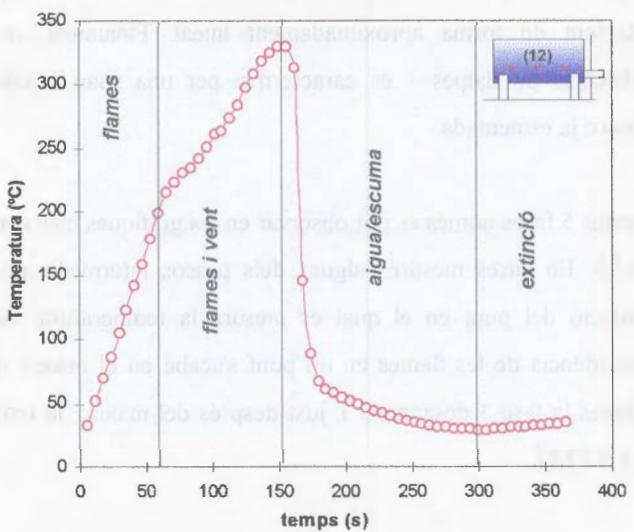


Figura 4.17.a Evolució de la temperatura segons el temps per la prova núm. 12 (4 m^2 , hexà) Termoparell núm. 12

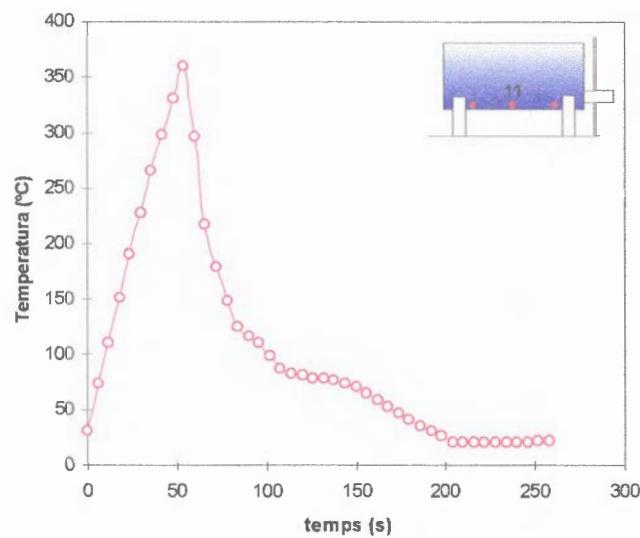


Figura 4.19 Evolució de la temperatura segons el temps per la prova núm. 13 (4 m^2 , hexà) i el termoparell núm. 11.

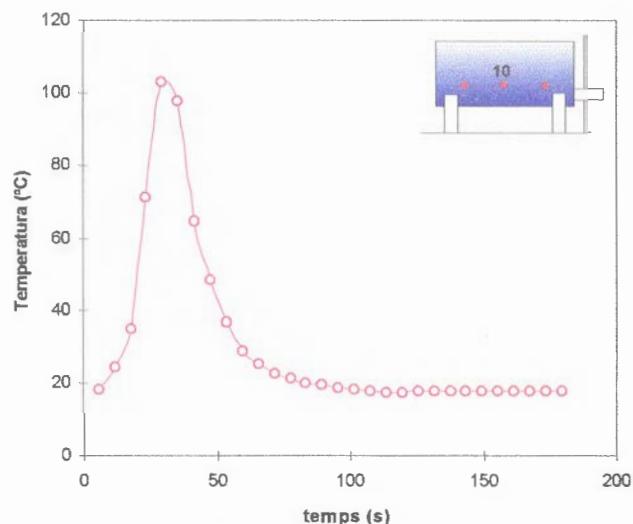


Figura 4.20 Evolució de la temperatura segons el temps pel termoparell núm. 10. Prova núm. 89 (12 m^2 , querosè).

aquest cas l'acció de l'aigua és essencialment de refrigeració de la superfície del dipòsit. Hi ha també una certa acció sobre les flames, la importància de les quals disminueix substancialment; aquesta acció és, però, molt inferior a la que s'aconsegueix quan s'utilitza una barreja d'aigua-escuma. És per això que continua havent-hi una notable aportació calorífica. La comparació d'ambdues situacions (aigua sola o barreja d'aigua-escuma) permet posar de manifest la importància de les accions respectives de refrigeració i refrigeració/extinció.

En les proves 13 i 14 s'utilitzà a més dels dos ruixadors habituals, un polvoritzador situat just sota el dipòsit. Això fa que el refredament d'aquesta zona sigui molt més ràpid que en els altres casos, tant si s'utilitza aigua sola com mescla aigua/escuma. Utilitzar la mescla aigua/escuma permet extingir les flames a més de refrigerar el dipòsit, mentre que l'aigua sola té només un efecte refrigerant sense contribuir gaire a l'extinció de les flames (vegeu la figura 4.19).

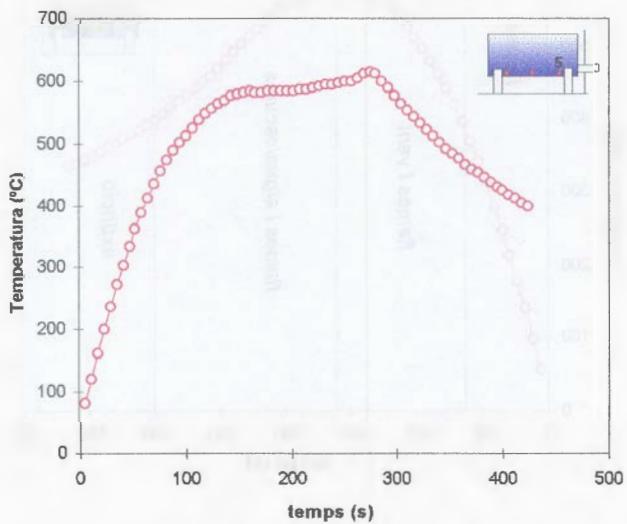


Figura 4.18 Evolució de la temperatura segons el temps per la prova núm. 15 (4 m^2 , hexà) i el termoparell núm. 5

**CAPÍTOL 5. MODELITZACIÓ DE L'EVOLUCIÓ DE
LES TEMPERATURES A LA PARET DEL
DIPÒSIT SEGONS EL TEMPS, EN LA
FASE PRÈVIA A L'EXTINCIÓ**

En el cas dels bassals de 12 m², les temperatures observades eren —com ja s'ha dit prèviament— més elevades. En les proves 88 i 89 el foc fou fàcil de controlar degut, probablement, al fet que el temps de preencesa havia estat només de 30 s i el foc no s'havia arribat a desenvolupar completament (vegeu la figura 4.20). En les proves 90 i 91 el temps de preencesa va ser de 60 s i això va fer que fossin més difícils de controlar. De fet en el cas de la prova 91, fou impossible arribar a apagar el foc. Les temperatures als diferents punts del dipòsit, tot i assolir un màxim i experimentar després una certa disminució (vegeu la figura 4.21), mantingueren uns valors força més elevats que en les altres proves.

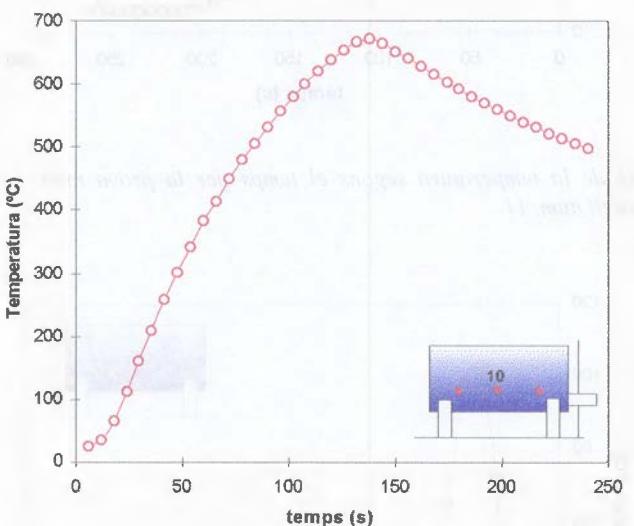


Figura 4.21 Evolució de la temperatura segons el temps pel termoparell núm. 10. Prova núm. 91 (12 m², querosè).

CAPÍTOL 5. MODELITZACIÓ DE L'EVOLUCIÓ DE LES TEMPERATURES A LA PARET DEL DIPÒSIT SEGONS EL TEMPS, EN LA FASE PRÈVIA A L'EXTINCIÓ.

5.1 Introducció

Després d'analitzar el treball realitzat per altres autors (vegeu el capítol 2) que han estudiat el comportament d'equips sotmesos a l'acció directa de les flames, s'ha vist que ningú es centrava en l'estudi de la fase transitòria. D'altra banda, en l'estudi de l'estat estacionari tots els autors tenen en comú el fet de prendre una temperatura de flama constant. En la majoria dels casos els models proposats per aquests autors no són contrastats amb dades experimentals i això els fa evidentment menys interessants pel que fa a la seva aplicabilitat. En el cas de [BIRK,88] els resultats de la modelització sí que es comparen amb dades experimentals; sorprendentment, malgrat les suposicions i incerteses que presenta aquest tipus de modelització, els resultats obtinguts són pràcticament idèntics a les dades experimentals, fet que introduceix alguns dubtes en relació amb la seva validesa.

En el cas que es planteja aquí es va partir de la base que actualment les plantes de procés i les plataformes petrolieres disposen de nombrosos sistemes de protecció que s'activen amb una gran rapidesa. Si bé és cert que aquests poden fallar, i aleshores l'incendi podria arribar a l'estat estacionari, en general el temps que passa entre l'inici de l'incendi i l'activació dels sistemes d'extinció sol ser d'uns 60 s de mitjana. Això fa que l'estudi del període transitori, mentre l'incendi s'està desenvolupant, esdevingui molt interessant.

Chile se modernizó en la medida de
la intensificación del tráfico de
migrantes que se llevó a la
desarrollada urbanización

que se observó en el
país entre 1940 y 1960.

En este período, se crearon
nuevas ciudades y se
expansió la red ferroviaria.

La población urbana creció
rápidamente, pasando de
25% en 1940 a 45% en 1960.

Este desarrollo se debió
a la llegada de miles de
migrantes al país.

lluminosa, que es manté força estable i una zona superior intermitent. Es sol definir l'alçada mitjana de la flama en estat estacionari¹ com aquella alçada per a la qual la intermitència a disminuït fins a 0.5, entenent per intermitència, $I(z)$, la fracció de temps durant la qual la flama es troba per damunt de l'alçada z . Pràcticament totes les correlacions que es troben a la bibliografia es basen en observacions experimentals; la més utilitzada és la de Thomas [SFPE90] encara que n'hi ha moltes d'altres, Zukoski, Heskstad, Stewart, etc.

Pel que fa a la forma de la flama la majoria d'estudis consideren la flama com un cilindre que en presència de vent es pot inclinar; en el cas que la superficie del bassal sigui quadrada o rectangular, el que fan és prendre la superficie circular que tingui la mateixa àrea que el bassal rectangular o quadrat. Aquesta aproximació, que en principi és prou bona en termes d'enginyeria, deixa de ser certa quan dins la flama hi ha un objecte de dimensions prou grans com per alterar la seva forma.

Tot i que aquest és un cas que apareix amb certa freqüència a la indústria de procés, a la bibliografia hi ha molt poca informació relativa al mateix. La més significativa és potser la que es pot trobar a [TUNÇ,85], on els autors caracteritzen la flama, corresponent a l'incendi d'un bassal circular amb un dipòsit cilíndric horitzontal en el centre, mitjançant una superficie axisimètrica que representen a partir d'un polinomi de quart grau. Aquest polinomi dóna el radi de la superficie externa de la flama en funció de l'alçada (vegeu la figura 5.1).

$$r(z) = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + a_3 z^3 + a_4 z^4 \quad (5.1)$$

Per definir aquest contorn van utilitzar fotografies obtingudes d'incendis grans (diàmetre ≥ 4.5 m) on el combustible utilitzat era JP-4 (combustible per aviació). En aquesta tesi s'ha seguit un criteri similar.

¹ Quan es parla de flama en estat estacionari es fa referència a l'estacionaricitat de la combustió, és a dir que la velocitat de combustió es manté constant en el temps. En general es pot considerar que l'estat estacionari, per a un foc de dimensions entre mitjanes i grans (entre 1 i 10 m de diàmetre) s'assoleix pocs minuts després de la ignició (entre 1 i 3 min, depenen també del tipus de combustible que estigui cremant i de la seva temperatura inicial).

Al capítol anterior s'ha vist que la temperatura de la flama variava considerablement amb el temps i amb l'alçada. Ha semblat interessant doncs, plantejar un model que tingués en compte tant l'estat transitori com la temperatura variable de la flama.

En aquest capítol es proposa, en primer lloc un model que permet determinar la radiació incident en un punt qualsevol de la superfície del dipòsit, seguint un plantejament semblant al proposat per Tunç [TUNÇ,85] però introduint una nova forma per a la superfície de la flama (adaptada a la forma rectangular del bassal) i introduint el concepte de temperatura de la flama variable. A continuació es proposa un altre model que utilitzant els càlculs obtinguts de l'anterior, permet determinar la temperatura a qualsevol punt de la superfície del dipòsit, en qualsevol instant de temps (abans de l'activació del sistema d'extinció). En aquest darrer cas els resultats obtinguts de la modelització es comparen amb les dades experimentals descrites en el capítol 4.

Globalment, el model que es proposa en aquest capítol s'ha plantejat i exposat pels incendis de 4 m², això no vol dir que només sigui aplicable a aquest cas ja que el model s'ha programat de manera que els paràmetres variables es puguin modificar. Així, caldria redefinir les dimensions del dipòsit i les seves característiques, les dimensions del bassal i la superfície de la flama, però una vegada modificat això el programa en si no variarà.

5.2 Definició i modelització de la superfície de la flama en estat estacionari

La superfície d'una flama, tant en la forma com en les dimensions, difícilment es pot considerar estacionària; està constantment en moviment i si bé aquest moviment no es pot dir que sigui totalment aleatori sí que en ell intervenen tants factors que el fan impossible de predir.

El paràmetre geomètric de la flama que ha estat més estudiat és l'alçada, sobretot per a bassals de foc lliures d'obstacles. Normalment en una flama es pot observar una zona inferior molt

Si es considerés la variació en les dimensions de la flama els resultats no diferirien gaire però el problema es complicaria significativament. És per això que s'ha preferit prendre des de l'inici una superfície mitjana constant i considerar en canvi la temperatura variable amb el temps i l'alçada.

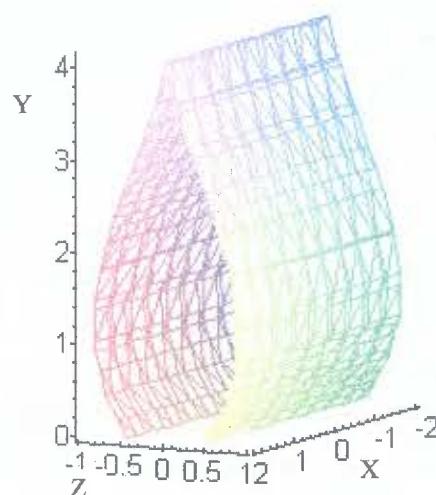


Figura 5.2 Contorn de la flama observat per als bassals de 4 m².

La funció següent permet obtenir analíticament el contorn de la flama que s'ha representat a la figura 5.2:

$$\begin{cases} g(y) = 0.449 + 0.734 \cdot y - 0.383 \cdot y^2 + 0.043 \cdot y^3 & \forall z > 0 \\ h(y) = -0.449 - 0.734 \cdot y + 0.383 \cdot y^2 - 0.043 \cdot y^3 & \forall z < 0 \end{cases} \quad (5.2)$$

On, com es pot veure, l'amplada de la flama té donada en funció de l'alçada i és constant per a cada valor de x . Aquesta funció té en compte la forma rectangular del bassal i no comprèn en canvi eventuals deformacions en els extrems; de tota manera, les imatges de video mostren que aquests efectes són negligibles respecte a les oscil·lacions de la flama.

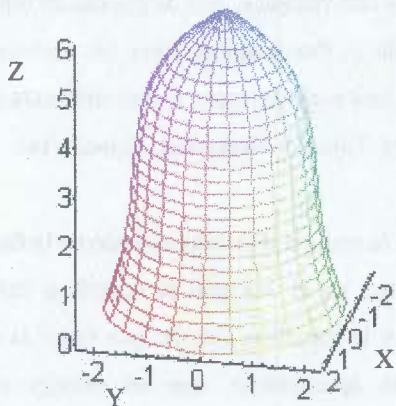


Figura 5.1 Forma de la flama segons Tunç [TUNÇ,85]

Després d'observar els enregistraments fets en video de les proves dutes a terme i efectuar medicions de les figures obtingudes dels mateixos, s'ha definit la forma per a la superficie de la flama corresponent als bassals de 4 m^2 que es pot veure a la figura 5.2.

En aquest cas, donades les característiques del bassal, de geometria rectangular, i del dipòsit, la flama no es pot aproximar per una superficie de revolució ni per una superficie amb simetria axial, que tot i representar una notable simplificació donarien errors massa grans. Ha calgut doncs recórrer a una forma més complexa.

Tot i que durant els primers 60 s l'incendi es troava en l'estat transitori i per tant les dimensions de la flama anaven creixent, observant les imatges enregistrades es pot veure que el creixement té lloc fonamentalment en els primers instants, de manera que a partir dels 10 primers segons les dimensions de la flama es mantenen aproximadament constants i l'únic que va variant és la seva temperatura. Com s'ha vist al capítol 4 la temperatura de la flama varia segons l'alçada i el temps.

4. La temperatura de la flama varia amb l'alçada i el temps fins a una alçada igual a la de la part més alta del dipòsit ($=1.92\text{ m}$); per alçades més grans es prendrà un valor constant de temperatura (igual a la temperatura existent a 1.92 m).
5. L'efecte de la transferència de calor per convecció es considera negligible davant la importància de la radiació.
6. El cilindre es considera com un cos negre.

Suposant una superfície arbitrària A_j i un volum de gas arbitrari V_i (vegeu la figura 5.3), el poder emissiu del volum dV_i (en funció de l'angle sòlid al voltant de dV_i) ve donat per la següent expressió [SIEG,92] :

$$E_\lambda = K_\lambda I_{b\lambda} dV_i d\lambda \quad (5.3)$$

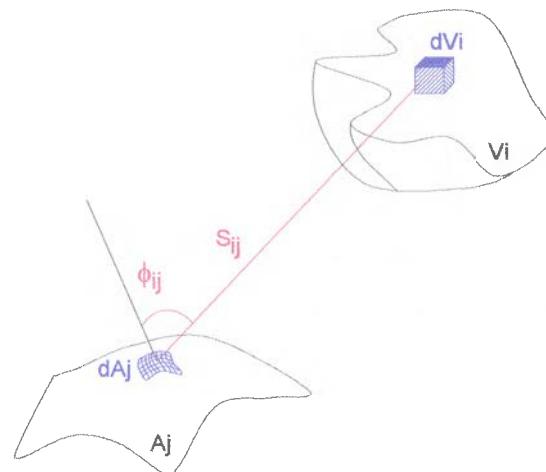


Figura 5.3 Intercanvi de calor per radiació entre un diferencial de volum (dV_i) i un diferencial de superfície (dA_j)

L'element de superfície dA_j subtendeix el següent angle sòlid quan es mira des de dV_i :

Evidentment, la forma que s'ha associat a la flama no permet tenir en compte les alteracions que aquesta experimenti degut al vent que induceix ella mateixa i que, com es pot veure als enregistraments sovint és important. Aquest és un aspecte que es considera fora de l'abast d'aquesta tesi i per tant, en aquest contexte, es suposarà que la flama és totalment simètrica.

5.3 Determinació de la radiació incident sobre un punt qualsevol de la superfície del dipòsit

5.3.1 Consideracions a tenir en compte

Per poder tractar matemàticament el problema s'han hagut de fer algunes suposicions simplificadores. Aquestes però s'han adoptat només perquè no suposaven alterar significativament els resultats, prenent sempre un criteri enginyeril. Cal tenir en compte que els valors experimentals de què es disposa estan sotmesos a un cert error, inevitable en aquest tipus d'experimentació a gran escala, i que per tant, obtenir uns resultats teòrics amb una gran precisió a costa de complicar excessivament els càlculs no tindria sentit.

Les suposicions que s'han fet són les següents:

1. Les flames es consideren com un cos gris, per tant l'emissió serà independent de la longitud d'ona.
2. La dispersió de la radiació és negligible.
3. El coeficient d'absorció de la flama (que donat que la dispersió es considera negligible serà igual al coeficient d'extinció) és constant arreu de la mateixa.

Per tant, per a poder determinar la quantitat total de calor que incideix sobre un punt qualsevol de la superfície del dipòsit, cal determinar prèviament $\cos(\phi_{ij})$ i S_{ij} entre aquest punt del dipòsit i un punt qualsevol del gas, després cal fer la integració per tot el volum de gas que veu el punt de la superfície del dipòsit considerat. Aquest volum depèn evidentment de la situació del punt en qüestió sobre el dipòsit (vegeu la figura 5.4).

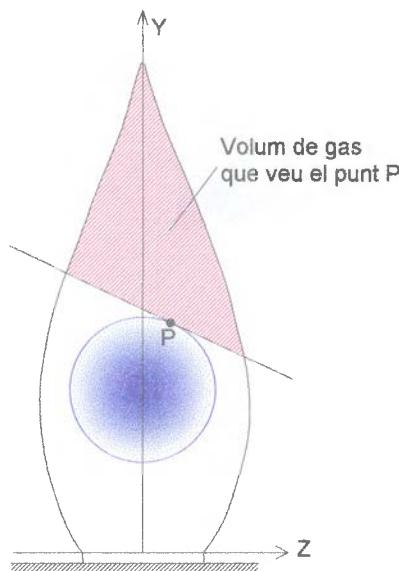


Figura 5.4 Volum de gas que emet radiació cap al punt P de la superfície del dipòsit.

La radiació emesa per un punt fora del volum ratllat no incidirà mai sobre el punt P, ja que serà interceptada per una altra part de la paret del dipòsit, i per tant no s'ha de considerar en el moment de fer la integració. Així els límits d'integració queden definits pel pla tangent al punt P del dipòsit, per la superfície de la flama i per les interseccions entre aquestes dues superfícies.

5.3.2 Pla tangent a un punt qualsevol de la superfície del dipòsit

Per a poder fer els càlculs de manera genèrica per a qualsevol punt del dipòsit, cal conèixer com s'ha vist a l'apartat anterior quina és l'equació del pla tangent a un punt de coordenades (a, b, c)

$$d\Omega = \frac{\cos \phi_{ij} dA_j}{S_{ij}^2} \quad (5.4)$$

La fracció de l'energia emesa per dV_i que és transmessa (és a dir que no és absorbida) a través del camí S_{ij} és:

$$\exp\left[-\int K_\lambda(S) dS\right] \quad (5.5)$$

Multiplicant aquests tres factors i integrant per tot el volum V_i i tota la superfície A_j , s'obté l'energia radiant provenint de V_i que arriba a A_j :

$$Q_\lambda = \int_{A_j} \int_{V_i} \frac{K_\lambda I_{b\lambda} \cos \phi_{ij} \exp\left[-\int K_\lambda(S) dS\right]}{S_{ij}^2} dV_i dA_j d\lambda \quad (5.6)$$

Per la suposició 3, K_λ és uniforme, aleshores:

$$\exp\left[-\int K_\lambda(S) dS\right] = \exp[-K_\lambda S] \quad (5.7)$$

Segons la suposició 1, la flama es considera com un cos gris, integrant per totes les λ s'obté finalment la quantitat total de calor bescanviada per radiació entre el volum V_i i la superfície A_j :

$$Q = \int_{V_i} \int_{A_j} \frac{K \cdot \sigma T_f^4 \cdot \cos(\phi_{ij}) \cdot \exp(-K \cdot S_{ij})}{\pi (S_{ij})^2} dV_i dA_j \quad (5.8)$$

On, com es pot veure a la figura 5.3, ϕ_{ij} és l'angle entre el vector normal a l'element diferencial de superfície i el vector S_{ij} que uneix l'element diferencial de volum amb el diferencial de superfície, i que representa el camí recorregut per la radiació entre ambdós elements.

punt P i $f(x,y,z)$ a la funció que cal integrar dins el volum $V=V_1+V_2$, la calor per radiació que rep el punt P es calcularia de la següent manera:

$$Q(kW/m^2) = \int_V f(x,y,z) dx dy dz = \int_{V_1} f(x,y,z) dx dy dz + \int_{V_2} f(x,y,z) dx dy dz \quad (5.12)$$

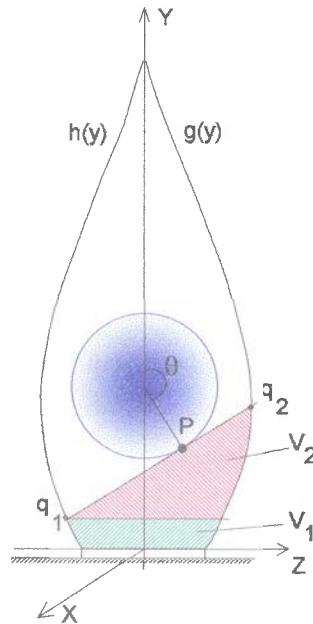


Figura 5.6 Definició dels límits d'integració.

Descomponant la integral en subvolums que tinguin els mateixos límits d'integració, al final el que s'ha de calcular és:

$$Q(kW/m^2) = \int_{-L/2}^{L/2} dx \int_0^{q_1(x)} dy \int_{h(x,y)}^{g(x,y)} f(x,y,z) dz + \int_{-L/2}^{L/2} dx \int_{q_1(x)}^{q_2(x)} dy \int_{R(y,z)}^{g(x,y)} f(x,y,z) dz \quad (5.13)$$

on q_1 i q_2 són les rectes d'intersecció entre el pla $R(y,z)$ i les superfícies $h(x,y)$ i $g(x,y)$ respectivament.

pertanyent a la superfície del dipòsit. L'equació matemàtica que defineix la superfície d'un cilindre de radi R i centre situat a h_3 (vegeu la figura 5.5) és:

$$y = \pm\sqrt{R^2 - z^2} + h_3 \quad \forall -1.5 \leq x \leq 1.5 \quad (5.9)$$

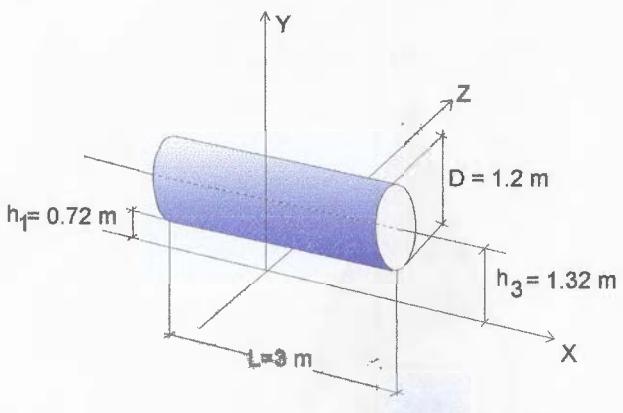


Figura 5.5 Esquema del dipòsit amb les seves dimensions i equació que en descriu la superfície.

Per al cilindre de la figura 5.5, l'equació que li correspon seria doncs:

$$y = \pm\sqrt{0.36 - z^2} + 1.32 \quad \forall -1.5 \leq x \leq 1.5 \quad (5.10)$$

El pla tangent a un punt de coordenades (a, b, c) que pertany a la superfície del dipòsit té definit per l'equació següent:

$$c \cdot z - c^2 + b \cdot y - b^2 - h_3 \cdot y + h_3 \cdot b = 0 \quad (5.11)$$

Depenent del punt P seleccionat, el volum de gas en el qual s'ha d'integrar la funció de l'equació (5.8) i els límits que defineixen aquest volum aniran variant. Així per exemple, suposant el punt P de la figura 5.6, i anomenant $g(y)$ i $h(y)$ a les funcions que defineixen la superfície de la flama a banda i banda de l'eix y , anomenant $R(y, z)$ a l'equació del pla tangent al

On $\cos(\phi_{ij})$ i S_{ij} són els paràmetres que cal definir, que depenen únicament de la geometria del sistema. A la figura 5.7 es pot veure l'esquema corresponent a aquest cas. Es pot deduir que:

$$\cos(\phi) = \frac{y - h_3 - r}{S} \quad (5.15)$$

$$S^2 = (y - h_3 - r)^2 + (x - a)^2 + z^2 \quad (5.16)$$

Per tant en aquest cas la funció a integrar tindrà la següent expressió:

$$f(x, y, z) = \frac{k \cdot \sigma}{\pi} \cdot \frac{T_f^4 \cdot (y - h_3 - r) \cdot \exp\left[-k \cdot \sqrt{(y - h_3 - r)^2 + (x - a)^2 + z^2}\right]}{\left((y - h_3 - r)^2 + (x - a)^2 + z^2\right)^{3/2}} \quad (5.17)$$

Els límits d'integració seran:

$$\begin{aligned} Eix x & [-1.5, 1.5] \\ Eix y & [h_2, H] \\ Eix z & [h(x, y), g(x, y)] \end{aligned}$$

On com ja s'ha vist h i g corresponen a la superfície de la flama.

Evidentment les rectes q_1 i q_2 es troben resolent el sistema que formen les equacions $R(y,z)$ amb $h(x,y)$ i $R(y,z)$ amb $g(x,y)$. Expressat pel cas concret del dipòsit i el bassal de 4 m^2 que es tenen en el mòdul experimental:

$$q_1 \Rightarrow \begin{cases} z = \frac{c^2 + b^2 - 1.32 \cdot b - (b - 1.32) \cdot y}{c} & (\text{pla } R(y,z)) \\ z = -0.449 - 0.734 \cdot y + 0.383 \cdot y^2 - 0.043 \cdot y^3 & (\text{superficie } h(x,y)) \end{cases}$$

$$q_2 \Rightarrow \begin{cases} z = \frac{c^2 + b^2 - 1.32 \cdot b - (b - 1.32) \cdot y}{c} & (\text{pla } R(y,z)) \\ z = 0.449 + 0.734 \cdot y - 0.383 \cdot y^2 + 0.043 \cdot y^3 & (\text{superficie } g(x,y)) \end{cases}$$

Com que l'equació del pla tangent al punt $P (R(y,z))$ es troba expressada en funció dels paràmetres a,b,c que defineixen les coordenades del punt P i cada sistema té tres solucions, de les quals com a mínim una és imaginària, es fa impossible de trobar l'expressió analítica de les funcions q_1 i q_2 que corresponen a les solucions reals. Això implica haver de resoldre els sistemes de manera individual per a cada punt abans de calcular la integral (vegeu l'Annex-III).

5.3.3 Variació del flux de calor longitudinal ($\theta = 0$)

En aquest apartat es veurà quina és l'expressió de la funció $f(x,y,z)$ que permet determinar el flux de calor incident sobre qualsevol punt de la línia superior del dipòsit i es veurà també quins són els límits d'integració per aquests punts.

L'equació (5.2) dóna la calor total intercanviada per radiació entre la superfície del dipòsit i el volum de gas V_i . Si el que es vol determinar és la calor que rep cada diferencial de superfície, aleshores:

$$Q(kW \cdot m^{-2}) = \int_{V_i} \frac{K \cdot \sigma}{\pi} \frac{T^4 \cdot \cos(\phi_{ij}) \cdot \exp(-K \cdot S_{ij})}{(S_{ij})^2} dV_i \quad (5.14)$$

quotient es farà cada vegada més gran, tendint a infinit. És clar, doncs, que hi ha d'haver un determinat angle θ a partir del qual l'equació (5.18) deixa de ser vàlida.

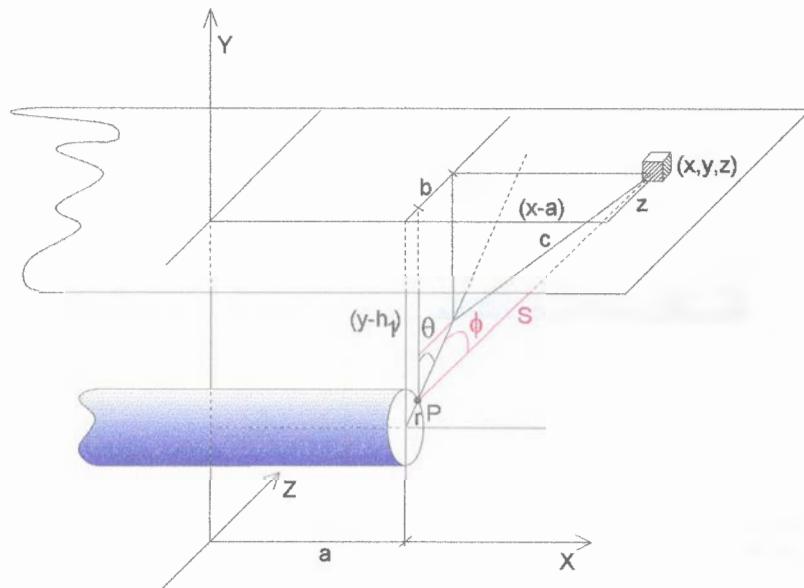


Figura 5.8 Esquema que representa la radiació que rep un punt situat a la superfície circumferencial del dipòsit.

A la figura 5.9 es pot veure un dels casos en què l'equació (5.18) no es compleix. Alhora, per aquests casos es pot comprovar que l'expressió de $\cos(\phi)$ que els correspon seria:

$$\cos(\phi) = \frac{(h_3 + r \cdot \cos(\theta) - y)}{S \cdot \cos(\theta)} \quad (5.20)$$

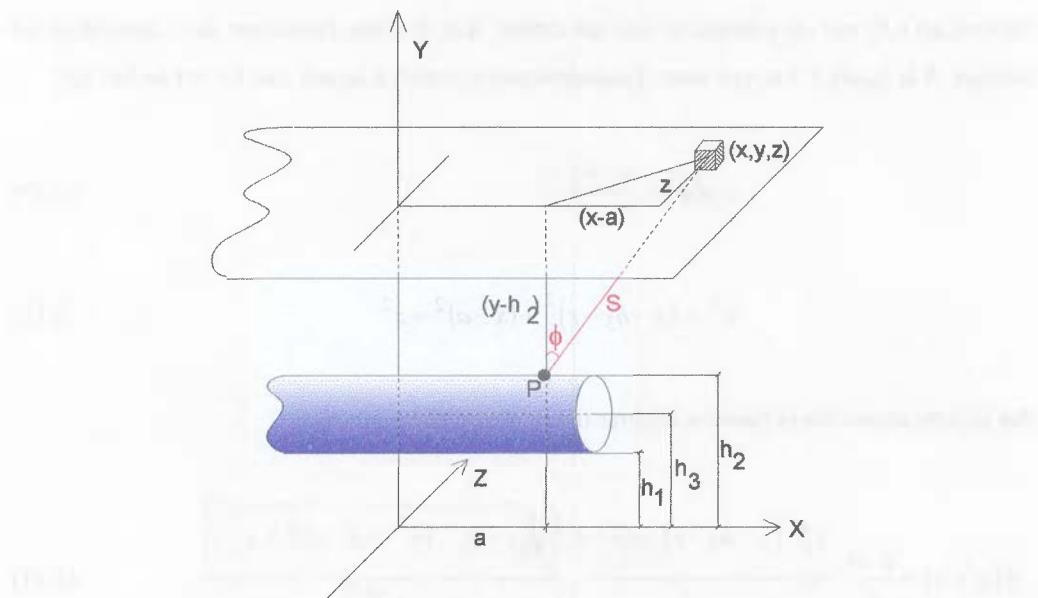


Figura 5.7 Esquema que representa la radiació que rep un punt situat a la línia superior del dipòsit.

5.3.4 Variació del flux de calor circumferencial ($0 < \theta \leq 180^\circ$)

En l'apartat anterior s'ha vist com determinar el flux de calor a la línia superior del dipòsit. Aquí es veurà com calcular-lo per aquells punts de la superficie del dipòsit que no compleixen $\theta=0$. En principi, segons l'esquema de la figura 5.8, es podria dir que:

$$\cos(\phi) = \frac{(z - r \cdot \sin(\theta))}{S \cdot \sin(\theta)} \quad (5.18)$$

$$S = \sqrt{(y - h_3 - r \cdot \cos(\theta))^2 + (z - r \cdot \sin(\theta))^2 + (x - a)^2} \quad (5.19)$$

Però així com l'equació (5.19) si que es compleix per a tots els punts, l'equació (5.18) ja es pot veure que pel fet de tenir el $\sin(\theta)$ en el denominador, a mesura que l'angle θ es faci més petit el

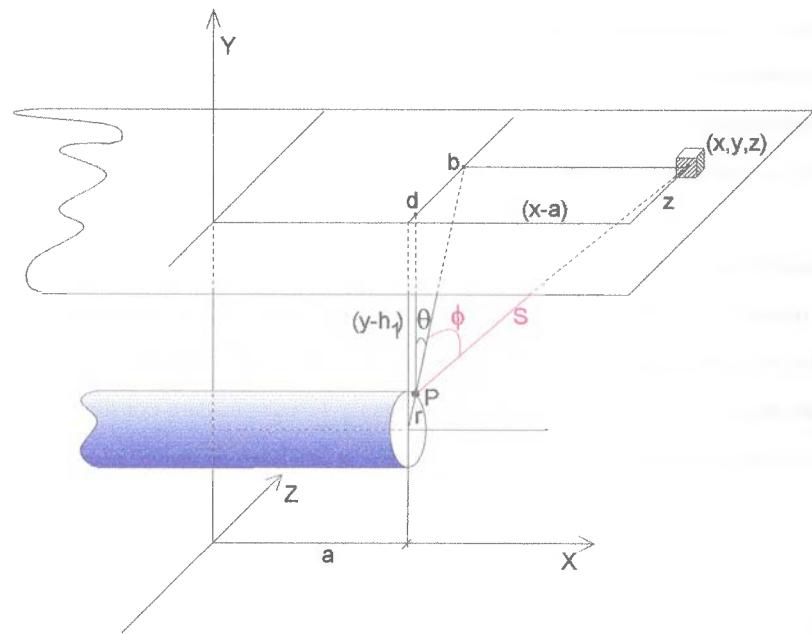


Figura 5.10 Esquema que representa la radiació que rep un punt situat a la superfície circumferencial del dipòsit.

Finalment la funció a integrar serà:

Per $S \cdot \cos(\phi) > \overline{Pb}$:

$$f(x, y, z) = \frac{K \cdot \sigma}{\pi} \cdot \frac{T_f^4 \cdot \left| \frac{(y - h_3 - r \cdot \cos(\theta))}{\cos(\theta)} \right| \cdot \exp \left[-K \cdot \sqrt{(y - h_3 - r \cdot \cos(\theta))^2 + (z - r \cdot \sin(\theta))^2 + (x - a)^2} \right]}{\left((y - h_3 - r \cdot \cos(\theta))^2 + (z - r \cdot \sin(\theta))^2 + (x - a)^2 \right)^{3/2}}$$

i per $S \cdot \cos(\phi) \leq \overline{Pb}$:

$$f(x, y, z) = \frac{K \cdot \sigma}{\pi} \cdot \frac{T_f^4 \cdot \left| \frac{(z - r \cdot \sin(\theta))}{\sin(\theta)} \right| \cdot \exp \left[-K \cdot \sqrt{(y - h_3 - r \cdot \cos(\theta))^2 + (z - r \cdot \sin(\theta))^2 + (x - a)^2} \right]}{\left((y - h_3 - r \cdot \cos(\theta))^2 + (z - r \cdot \sin(\theta))^2 + (x - a)^2 \right)^{3/2}}$$

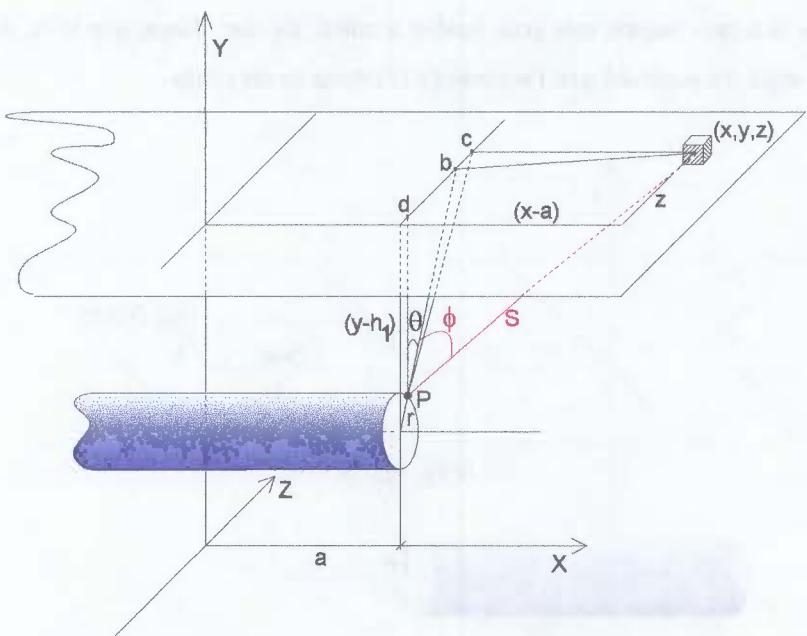


Figura 5.9 Esquema que representa la radiació que rep un punt situat a la superfície circumferencial del dipòsit.

Cal observar també que no només l'angle θ fa que es verifiqui una equació o l'altra, també depèn del diferencial de volum que s'hagi agafat. Així a la mateixa figura 5.9, si la coordenada z del diferencial de volum s'hagués agafat més petita ens trobaríem en el mateix cas que la figura 5.8. Aleshores, la condició que fa que es passi d'una funció a l'altra pot veure's a la figura 5.10, on hi ha una determinada combinació de θ i (x, y, z) per a la qual les dues equacions (5.18) i (5.20) prenen el mateix valor, i per tant ambdues són igualment aplicables.

És el cas en el qual $S \cdot \cos(\phi)$ coïncideix amb el segment \overline{Pb} (que uneix el punt P de la superfície del dipòsit amb el punt b , intersecció entre la prolongació del radi i el pla horitzontal on pertany el diferencial de volum escollit). Per a totes aquelles combinacions en què $S \cdot \cos(\phi) > \overline{Pb}$ s'haurà d'utilitzar l'equació (5.20) i per a la resta, l'equació (5.10). El valor de S serà en tots els casos el mateix de l'equació (5.11).

CAS 2:

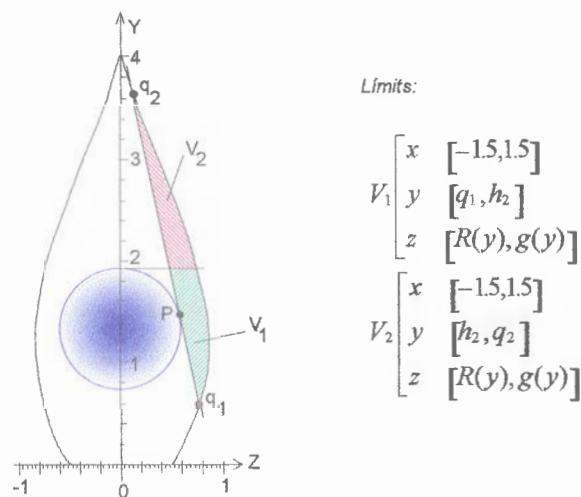


Figura 5.12 Límits d'integració pel cas en què θ és proper a 90° .

CAS 3 ($q_2 < h_2$):

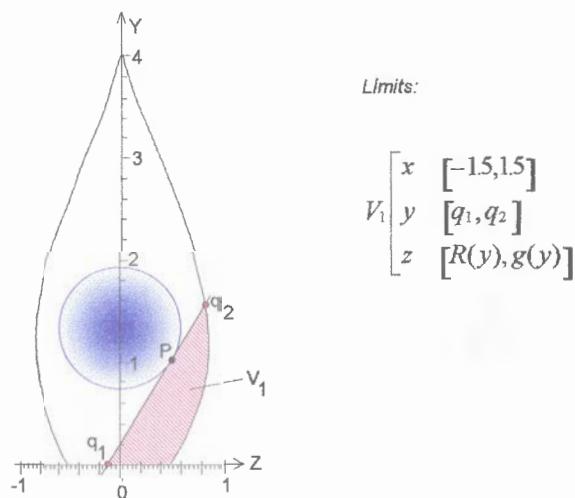


Figura 5.13 Límits d'integració per $90^\circ < q < 180^\circ$.

Es pot comprovar que aquestes equacions, així expressades són vàlides per a qualsevol valor de l'angle θ comprès entre 0° i 180° incloent els dos valors extrems. Donada la simetria del sistema que s'està considerant, la resta de punts entre 180° i 360° , tindran el mateix valor de Q que els corresponents a la seva imatge espectral.

Pel que fa als límits d'integració, en aquest cas la seva definició es complica ja que s'han de considerar diverses possibilitats. A continuació s'exposen tots els casos possibles que poden aparèixer dependent del punt de la superficie del dipòsit que s'hagi considerat. Cal recordar que per a alçades superiors a h_2 la temperatura de la flama, T_f , es considera constant i igual al valor que pren per aquesta alçada.

CAS I:

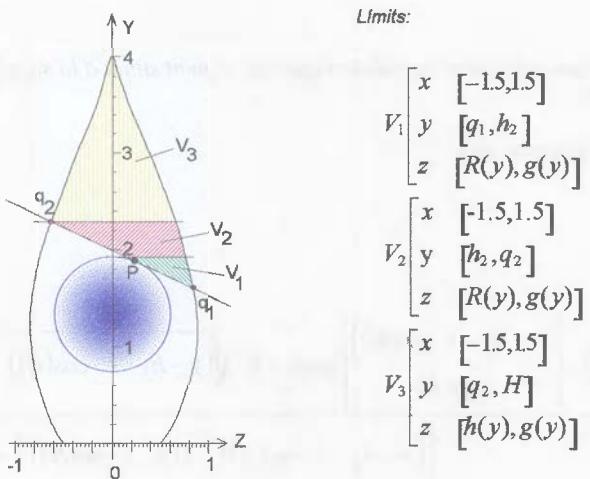


Figura 5.11 Límits d'integració pel cas en què $0 < \theta \ll 90^\circ$.

A l'Annex-III s'explica el mètode numèric utilitzat per a la resolució de la integral de volum.

5.4 Resultats obtinguts amb el model per a l'estimació de la radiació que rep el dipòsit

Dels resultats obtinguts amb el model que estima la radiació a qualsevol punt del dipòsit es pot observar que la meitat inferior del dipòsit rep molta més radiació que la meitat superior, de l'ordre del doble (vegeu la figura 5.16); això es pot atribuir a dos factors, en primer lloc a la temperatura de la flama que augmenta a mesura que disminueix l'alçada i en segon lloc a la forma que s'ha associat a la flama, que té molt més gruix a la part inferior que a la superior. Dins la meitat inferior la línia més baixa corresponent a $\theta=180^\circ$ és la zona que rep més radiació, això es correspon amb les dades experimentals on aquests punts són els que assoleixen temperatures més elevades.

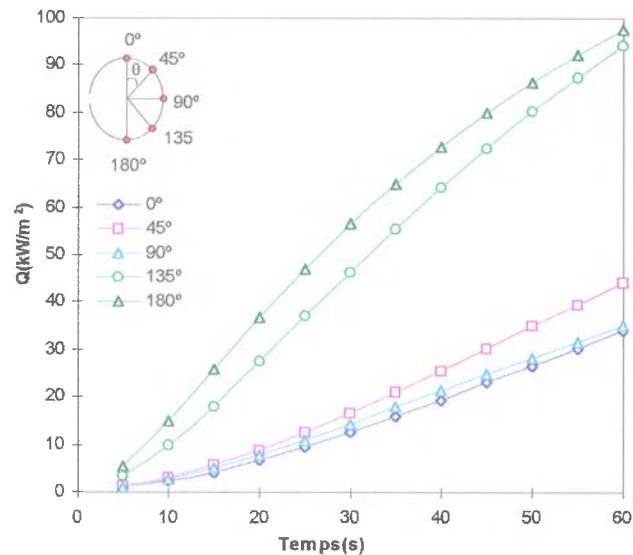
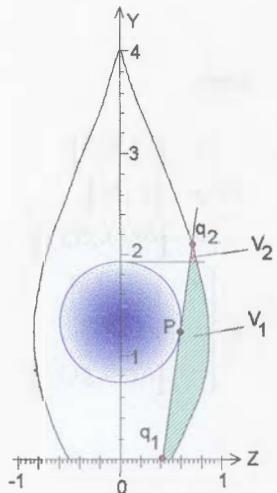


Figura 5.16 Calor que reben per radiació els punts situats a una distància d'1 m des del centre del dipòsit ($a=1$ m)

CAS 4 ($q_2 > h_2$):



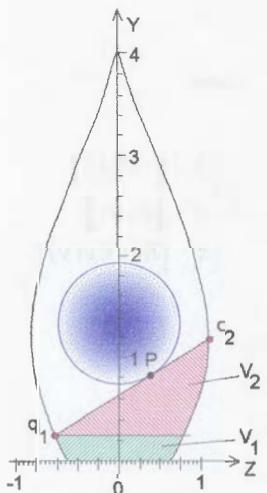
Limits:

$$V_1 \begin{cases} x & [-1.5, 1.5] \\ y & [q_1, h_2] \\ z & [R(y), g(y)] \end{cases}$$

$$V_2 \begin{cases} x & [-1.5, 1.5] \\ y & [h_2, q_2] \\ z & [R(y), g(y)] \end{cases}$$

Figura 5.14 Límits d'integració per a θ proper a 90° i q_2 superior a h_2 .

CAS 5:



Limits:

$$V_1 \begin{cases} x & [-1.5, 1.5] \\ y & [0, q_1] \\ z & [h(y), g(y)] \end{cases}$$

$$V_2 \begin{cases} x & [-1.5, 1.5] \\ y & [q_1, q_2] \\ z & [R(y), g(y)] \end{cases}$$

Figura 5.15 Límits d'integració pel cas en què θ és proper a 180° .

un temps de càlcul excessiu, mentre que els resultats obtinguts d'aquesta manera són suficientment precisos.

Pel que fa a la calor circumferencial, és a dir a la calor que reben els punts situats a una mateixa distància del centre del dipòsit a mesura que es va variant l'angle, la forma de la corba depèn de la forma que tingui la flama. Si la flama té unes dimensions molt més grans que el dipòsit la calor que reben els punts depèn bàsicament de l'alçada i per tant la corba és creixent uniformement des d'angle 0° fins a 180° . En el cas que s'està estudiant la flama no és gaire més ample que el dipòsit; això fa que el gruix que tingui en cada punt també tingui una influència important en la radiació.

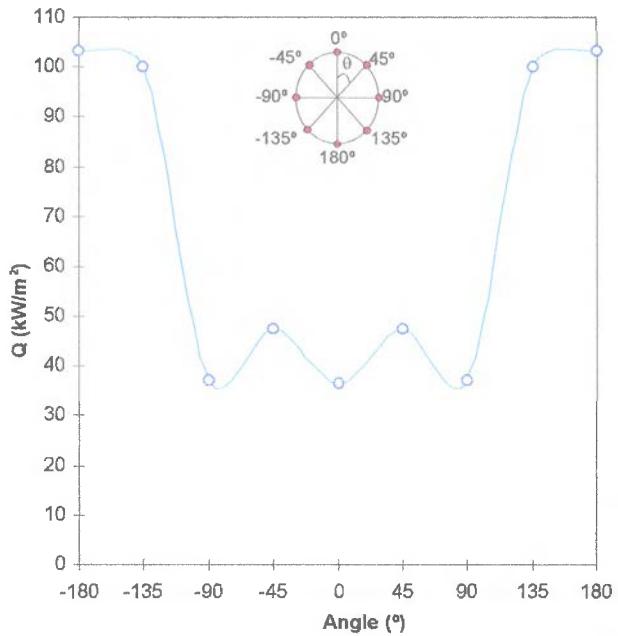


Figura 5.18 Variació de la calor en funció de l'angle θ per $a=1$ m.

Aquest fenomen es pot observar a la figura 5.18 on es pot veure que entre els angles 50° i 100° hi ha el mínim de radiació; intuitivament sembla que els punts de més amunt, per angles més petits, haurien de tenir valors de radiació més petits, però si s'observa la figura 5.13 es pot

comprovar que els punts entre 50° i 100° tenen menys volum de flama a la dreta del pla tangent al punt, i per tant encara que la flama tingui una temperatura més alta que pels punts entre 0° i 50° el balanç fa que la radiació sigui lleugerament inferior.

A la figura 5.19 es pot apreciar clarament la irregularitat en la distribució de la radiació incident damunt la superfície del dipòsit, degut principalment a la forma que adquireix la flama.

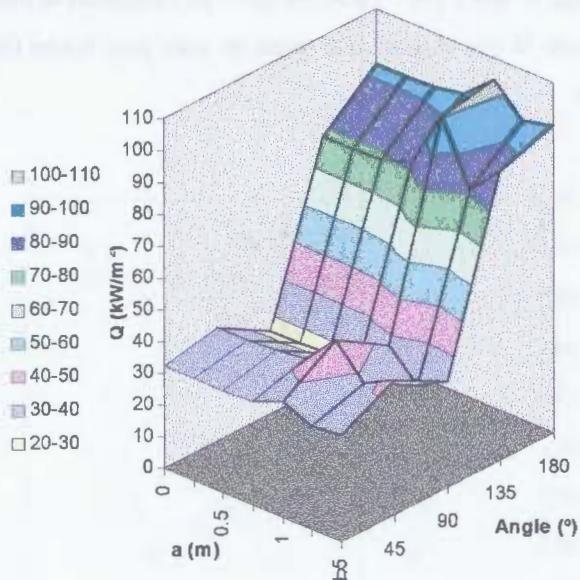


Figura 5.19 Calor que rep la superfície del dipòsit en l'instant $t=60\text{ s}$.

Cal tenir en compte que el diàmetre del dipòsit, 1.2 m, és superior a l'amplada del bassal, 1 m, i això fa que la flama es deformi considerablement en la zona on hi ha el dipòsit i el seu gruix sigui menor, sobretot en la zona al voltant de $\theta=90^\circ$, per això també en aquesta zona és on la radiació incident és menor.

5.5 Modelització de l'evolució de les temperatures a la paret del dipòsit segons el temps

En aquest apartat es pretén modelitzar l'evolució de la temperatura a qualsevol punt del dipòsit, en funció del temps. Per fer-ho s'ha escollit un mètode numèric per elements finits. La idea consisteix en agafar el cos i dividir-lo en parts; com que no és possible conèixer la temperatura a tots els punts hom es conforma en conèixer-la en determinats punts anomenats nodes (vegeu la figura 5.20).

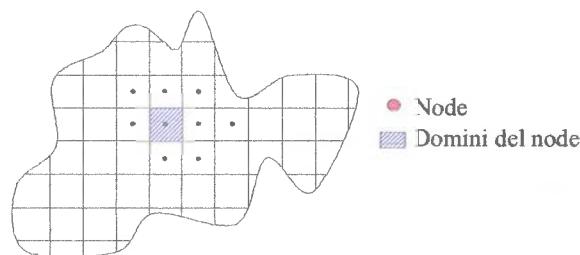


Figura 5.20 Discretització d'una superfície. Nodes i dominis.

D'aquesta manera s'obté una distribució discreta de temperatures. Per a fer el plantejament general es suposa un node qualsevol i envoltat de N nodes i es fixa també una discretització per a l'eix de temps (vegeu la figura 5.21).

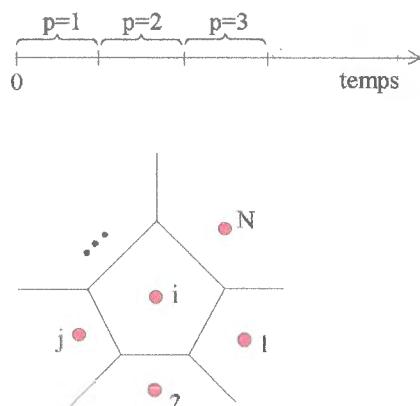


Figura 5.21 Representació d'un node qualsevol envoltat per N nodes. Discretització del temps.

La calor que el node j cedeix al node i en l'interval de temps p té donat per:

$$q_{j \rightarrow i} = K_{j \leftrightarrow i} \cdot (T_j^{(p)} - T_i^{(p)}) \quad (5.21)$$

per tant la calor total que els nodes veïns cedeixen al node i serà:

$$\sum_{j=1}^N q_{j \leftrightarrow i}^{(p)} = q_{1 \leftrightarrow i}^{(p)} + q_{2 \leftrightarrow i}^{(p)} + \dots + q_{N \leftrightarrow i}^{(p)} \quad (5.22)$$

A banda d'aquesta calor, el node i pot tenir generació de calor interna que s'anomena q_i . Fent el balanç de calor, tota aquesta energia que entra ha de ser igual a la variació del contingut d'energia del node i en l'interval de temps de p a $p+1$, expressat en termes de potència:

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = \rho_i \cdot c_i \cdot V_i \cdot \frac{(T_i^{(p+1)} - T_i^{(p)})}{\Delta t} \quad (5.23)$$

L'equació global del balanç queda doncs:

$$q_i + \sum_{j=1}^N K_{j \leftrightarrow i} (T_j^{(p)} - T_i^{(p)}) = \rho_i \cdot c_i \cdot V_i \cdot \frac{(T_i^{(p+1)} - T_i^{(p)})}{\Delta t} \quad (5.24)$$

D'aquest plantejament se'n deriven tres mètodes:

- Mètode explícit
- Mètode implicit
- Mètode de Crank-Nicholson

El mètode s'anomena *Explicit* quan les temperatures dels nodes veïns s'agafen en l'instant p i es correspon exactament amb l'equació (5.24). En aquest cas en l'instant p totes les temperatures són conegeudes i determinar la temperatura T_i en l'instant $p+1$ és directe. Perquè aquest mètode convergeixi cal que es compleixi la següent condició:

$$\Delta t < \frac{c_i \cdot \rho_i \cdot V_i}{\sum_{j=1}^n K_{ij}} \quad (5.25)$$

Pel que fa al mètode *Implicit* s'obté quan les temperatures dels nodes veïns s'agafen en l'instant $p+1$, és a dir:

$$q_i + \sum_{j=1}^N K_{j \leftrightarrow i} \left(T_j^{(p+1)} - T_i^{(p+1)} \right) = \rho_i \cdot c_i \cdot V_i \cdot \frac{\left(T_i^{(p+1)} - T_i^{(p)} \right)}{\Delta t} \quad (5.26)$$

En aquest cas obtenir les temperatures a cada un dels nodes no és directe, cal resoldre un sistema de tantes equacions i incògnites com nodes es tinguin, però té l'avantatge que no cal verificar cap condició per a l'estabilitat, Δt pot ser en principi tan gran com es vulgui i només cal tenir en compte els errors d'aproximació.

Per últim, en el mètode de *Crank-Nicholson* el que es fa és interpolar les temperatures dels nodes veïns entre l'instant p i el $p+1$.

$$F \cdot \sum_{j=1}^N K_{ji}^{n+1} \left(T_j^{n+1} - T_i^{n+1} \right) + (1-F) \cdot \sum_{j=1}^N K_{ji}^n \left(T_j^n - T_i^n \right) + q_i = C_i \cdot \frac{\left(T_i^{n+1} - T_i^n \right)}{\Delta t} \quad (5.27)$$

On si $F=0.5$ es té el mètode de Crank-Nicholson, si $F=1$ el mètode implícit i si $F=0$ el mètode explícit. El mètode de Crank-Nicholson també requereix una condició per a l'estabilitat, encara

que en aquest cas es pot treballar amb intervals de temps més grans que en el cas del mètode explícit:

$$1 - \frac{(1-F)\Delta t}{C_i} \sum_{j=1}^N K_{j \leftrightarrow i}^{(p)} \geq 0 \quad (5.28)$$

En aquest cas s'ha escollit el mètode implícit tot i que qualsevol dels mètodes seria aplicable, ja que els intervals de temps amb què es treballa són suficientment petits. Cal tenir en compte que el temps total de modelització que és d'un minut és ja molt petit.

5.5.1 Divisió del dipòsit en nodes

Degut a la simetria que té la flama i el dipòsit, aquest es pot dividir en quatre parts que idealment presentaran la mateixa distribució de temperatures. S'ha de dir idealment perquè en la realitat el sistema no és totalment simètric: no ho és la flama ni tampoc el mòdul on es troba el dipòsit i això fa que les temperatures enregistrades experimentalment no siguin les mateixes en punts simètrics dels quatre blocs en què s'ha dividit el dipòsit (vegeu la figura 5.22).

Quan es vol modelitzar el fenomen, però, cal suposar en principi que el sistema és ideal i, en tot cas, posteriorment es pot comprovar mitjançant els resultats experimentals si aquesta suposició és encertada o no.

Taula 5.1 Equivalència entre nodes i termoparell.

Node	Termoparell
0	20
3	14
5	8
8	15,19
10	9,13
18	16,18
20	4,6
23	17
25	11

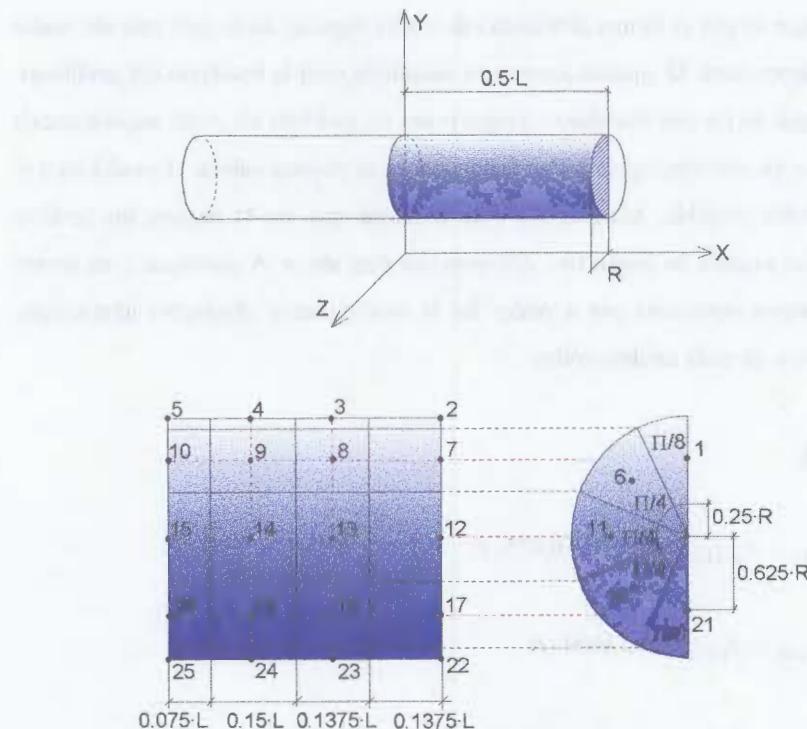


Figura 5.22 Esquema on es mostra el troç de cilindre que s'ha prèn per fer la simulació. Distribució dels nodes dins aquest troç seleccionat.

A la figura 5.22 hi ha dibuixats i numerats els 26 nodes en què s'ha dividit la porció de dipòsit que es modelitzarà. Per tal de poder comprovar els resultats obtinguts de la modelització amb les dades experimentals, s'ha fet coincidir alguns d'aquests nodes amb els punts de mesura fets experimentalment. La taula 5.1 mostra l'equivalència entre nodes i termoparells de mesura de la temperatura a la superfície del dipòsit.

5.5.2 Distàncies i àrees internodals. Volum dels nodes

Normalment sempre que es pot es fa una distribució de nodes regular, en la qual tots els nodes tinguin les mateixes dimensions. D'aquesta manera es simplifica molt la resolució del problema. En aquest cas s'ha hagut de fer una distribució irregular per tal que tots els punts experimentals tinguessin un node que els correspongués i d'aquesta manera es pogués validar el model amb el màxim nombre de dades possible. Malgrat tot s'ha procurat que no hi hagués un nombre excessiu de nodes i que aquests no fossin tots diferents uns dels altres. A continuació es donen els paràmetres geomètrics necessaris per a poder fer la modelització: distàncies internodals, àrees internodals i volum de cada un dels nodes.

Distàncies internodals

$$d_{0 \rightarrow 1} = d_{0 \rightarrow 6} = d_{0 \rightarrow 11} = d_{0 \rightarrow 16} = d_{0 \rightarrow 21} = 0.625 \cdot R$$

$$d_{1 \rightarrow 6} = d_{6 \rightarrow 11} = d_{11 \rightarrow 16} = d_{16 \rightarrow 21} = 0.4909 \cdot R$$

$$d_{1 \rightarrow 2} = d_{6 \rightarrow 7} = d_{11 \rightarrow 12} = d_{16 \rightarrow 17} = d_{21 \rightarrow 22} = 0.375 \cdot R$$

$$d_{2 \rightarrow 3} = d_{7 \rightarrow 8} = d_{12 \rightarrow 13} = d_{17 \rightarrow 18} = d_{22 \rightarrow 23} = 0.2063 \cdot L$$

$$d_{3 \rightarrow 4} = d_{8 \rightarrow 9} = d_{13 \rightarrow 14} = d_{18 \rightarrow 19} = d_{23 \rightarrow 24} = 0.1438 \cdot L$$

$$d_{4 \rightarrow 5} = d_{9 \rightarrow 10} = d_{14 \rightarrow 15} = d_{19 \rightarrow 20} = d_{24 \rightarrow 25} = 0.15 \cdot L$$

$$\left. \begin{array}{l} d_{2 \rightarrow 7} = d_{3 \rightarrow 8} = d_{4 \rightarrow 9} = d_{5 \rightarrow 10} \\ d_{7 \rightarrow 12} = d_{8 \rightarrow 13} = d_{9 \rightarrow 14} = d_{10 \rightarrow 15} \\ d_{12 \rightarrow 17} = d_{13 \rightarrow 18} = d_{14 \rightarrow 19} = d_{15 \rightarrow 20} \\ d_{17 \rightarrow 22} = d_{18 \rightarrow 23} = d_{19 \rightarrow 24} = d_{20 \rightarrow 25} \end{array} \right\} = 0.7854 \cdot R$$

Àrees internodals

$$A_{0 \rightarrow 1} = A_{0 \rightarrow 21} = 0.0982 \cdot R \cdot e$$

$$A_{0 \rightarrow 6} = A_{0 \rightarrow 11} = A_{0 \rightarrow 16} = 0.1963 \cdot R \cdot e$$

$$A_{1 \rightarrow 2} = A_{21 \rightarrow 22} = 0.3927 \cdot R \cdot e$$

$$A_{6 \rightarrow 7} = A_{11 \rightarrow 12} = A_{16 \rightarrow 17} = 0.7854 \cdot R \cdot e$$

$$A_{2 \rightarrow 3} = A_{3 \rightarrow 4} = A_{4 \rightarrow 5} = A_{22 \rightarrow 23} = A_{23 \rightarrow 24} = A_{24 \rightarrow 25} = 0.3927 \cdot R \cdot e$$

$$A_{7 \rightarrow 8} = A_{8 \rightarrow 9} = A_{9 \rightarrow 10} = A_{12 \rightarrow 13} = A_{13 \rightarrow 14} = A_{14 \rightarrow 15} = A_{17 \rightarrow 18} = A_{18 \rightarrow 19} = \\ = A_{19 \rightarrow 20} = 0.7854 \cdot R \cdot e$$

$$A_{2 \rightarrow 7} = A_{7 \rightarrow 12} = A_{12 \rightarrow 17} = A_{17 \rightarrow 22} = A_{3 \rightarrow 8} = A_{8 \rightarrow 13} = A_{13 \rightarrow 18} = A_{18 \rightarrow 23} = 0.1375 \cdot L \cdot e$$

$$A_{4 \rightarrow 9} = A_{9 \rightarrow 14} = A_{14 \rightarrow 19} = A_{19 \rightarrow 24} = 0.15 \cdot L \cdot e$$

$$A_{5 \rightarrow 10} = A_{10 \rightarrow 15} = A_{15 \rightarrow 20} = A_{20 \rightarrow 25} = 0.075 \cdot L \cdot e$$

Àrea i volum dels nodes

Com que l'àrea dels nodes escollits és gran comparada amb el gruix que pugui tenir la paret del dipòsit, es considerarà que el volum dels nodes és directament la seva superfície multiplicada pel seu gruix, prescindint del fet que la superfície disminueix amb el gruix ja que es tracta d'una porció de cilindre (vegeu la figura 5.23).

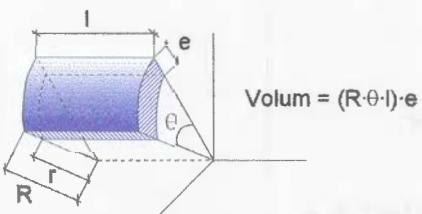


Figura 5.23 Representació del volum d'un node.

A continuació es dóna la superfície externa de cada un dels nodes, és a dir la superfície que rebrà radiació. Pel que ja s'ha explicat, el volum serà el mateix valor multiplicat pel gruix de la paret del dipòsit, e .

$$A_0 = 0.0982 \cdot R^2$$

$$A_1 = A_{21} = 0.1841 \cdot R^2$$

$$A_6 = A_{11} = A_{16} = 0.3682 \cdot R^2$$

$$A_2 = A_3 = A_{22} = A_{23} = 0.054 \cdot R \cdot L$$

$$A_4 = A_{24} = 0.0589 \cdot R \cdot L$$

$$A_5 = A_{25} = 0.0295 \cdot R \cdot L$$

$$A_7 = A_{12} = A_{17} = A_8 = A_{13} = A_{18} = 0.108 \cdot R \cdot L$$

$$A_9 = A_{14} = A_{19} = 0.1178 \cdot R \cdot L$$

$$A_{10} = A_{15} = A_{20} = 0.0589 \cdot R \cdot L$$

5.5.3 Conductàncies

$$K_{0 \leftrightarrow 1} = K_{0 \leftrightarrow 21} = 0.1571 \cdot R \cdot e \cdot \lambda$$

$$K_{0 \leftrightarrow 6} = K_{0 \leftrightarrow 11} = K_{0 \leftrightarrow 16} = 0.3142 \cdot e \cdot \lambda$$

$$K_{1 \leftrightarrow 6} = K_{6 \leftrightarrow 11} = K_{11 \leftrightarrow 16} = K_{16 \leftrightarrow 21} = 1.528 \cdot e \cdot \lambda$$

$$K_{1 \leftrightarrow 2} = K_{21 \leftrightarrow 22} = 1.047 \cdot e \cdot \lambda$$

$$K_{6 \leftrightarrow 7} = K_{11 \leftrightarrow 12} = K_{16 \leftrightarrow 17} = 2.094 \cdot e \cdot \lambda$$

$$K_{2 \leftrightarrow 7} = K_{7 \leftrightarrow 12} = K_{12 \leftrightarrow 17} = K_{17 \leftrightarrow 22} = K_{3 \leftrightarrow 8} = K_{8 \leftrightarrow 13} = K_{13 \leftrightarrow 18} = K_{18 \leftrightarrow 23} = 0.1751 \cdot \frac{L \cdot e \cdot \lambda}{R}$$

$$K_{2 \leftrightarrow 3} = K_{22 \leftrightarrow 23} = 1.904 \cdot \frac{R \cdot e \cdot \lambda}{L}$$

$$K_{7 \leftrightarrow 8} = K_{12 \leftrightarrow 13} = K_{17 \leftrightarrow 18} = 3.807 \cdot \frac{R \cdot e \cdot \lambda}{L}$$

$$K_{3 \leftrightarrow 4} = K_{23 \leftrightarrow 24} = 2.731 \cdot \frac{R \cdot e \cdot \lambda}{L}$$

$$K_{8 \leftrightarrow 9} = K_{13 \leftrightarrow 14} = K_{18 \leftrightarrow 19} = 5.4618 \cdot \frac{R \cdot e \cdot \lambda}{L}$$

$$K_{4 \leftrightarrow 5} = K_{24 \leftrightarrow 25} = 2.618 \cdot \frac{R \cdot e \cdot \lambda}{L}$$

$$K_{9 \leftrightarrow 10} = K_{14 \leftrightarrow 15} = K_{19 \leftrightarrow 20} = 5.236 \cdot \frac{R \cdot e \cdot \lambda}{L}$$

$$K_{3 \leftrightarrow 8} = K_{8 \leftrightarrow 13} = K_{13 \leftrightarrow 18} = K_{18 \leftrightarrow 23} = 0.1751 \cdot \frac{L \cdot e \cdot \lambda}{R}$$

$$K_{4 \leftrightarrow 9} = K_{9 \leftrightarrow 14} = K_{14 \leftrightarrow 19} = K_{19 \leftrightarrow 24} = 0.191 \cdot \frac{L \cdot e \cdot \lambda}{R}$$

$$K_{5 \leftrightarrow 10} = K_{10 \leftrightarrow 15} = K_{15 \leftrightarrow 20} = K_{20 \leftrightarrow 25} = 0.0955 \cdot \frac{L \cdot e \cdot \lambda}{R}$$

5.5.4 Resolució del sistema d'equacions

Partint de l'instant inicial $t=0$ en què la temperatura de cada node es considera igual a la temperatura ambient, es planteja l'equació del mètode implícit per a cada un dels nodes en l'instant posterior $t=t+\Delta t$. Així s'obté un sistema de 26 equacions amb 26 incògnites en el qual cada equació dóna la temperatura d'un node a l'instant n en funció de la temperatura dels nodes que l'envolten en el mateix instant i del mateix node en l'instant anterior $n-1$.

Aquest sistema s'ha de resoldre per a cada increment de temps que es pren. Aquí el sistema es resol mitjançant una de les rutines de C que utilitza un mètode numèric de factorització triangular: la descomposició LU (vegeu l'Annex-III).

5.6 Resultats obtinguts amb el model que prediu les temperatures a la paret del dipòsit segons el temps

Pel que fa a l'evolució de les temperatures amb el temps en general el model tendeix a subestimar les temperatures assolides en els diferents punts del dipòsit, sobretot a la meitat inferior d'aquest. A la figura 5.24.a es pot veure que pel termoparell 14, situat a la part superior del dipòsit, les temperatures obtingudes experimentalment són força semblants (diferències de 25° essent la temperatura màxima de 350 K) a les determinades pel model; ara bé, pel termoparell 11 (vegeu la figura 5.24.b) situat a la part inferior del dipòsit, les temperatures

obtingudes experimentalment són força més grans que les determinades pel model, amb diferències de l'ordre de 230° (essent la temperatura màxima de 650 K), és a dir que entre la part de dalt i la part de baix l'error pràcticament es duplica.

A l'hora d'analitzar aquests resultats cal tenir molt present que el paràmetre més important en el model és la temperatura de flama, ja que és aquesta que determina la quantitat de calor que rep el dipòsit. Qualsevol error en la determinació de la temperatura de la flama repercutirà directament sobre l'estimació de les temperatures assolides pel dipòsit (vegeu l'Annex II).

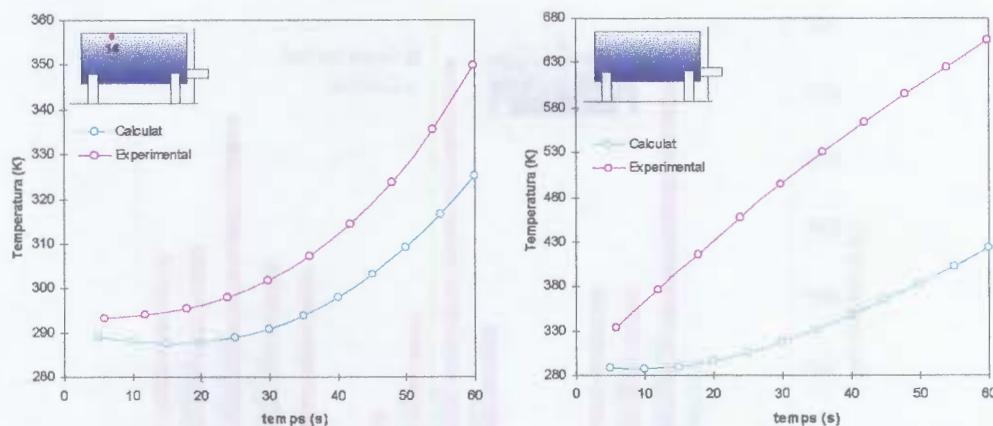


Figura 5.24 Evolució de la temperatura amb el temps, experimental i calculada segons el model. a) pel termoparell 14. b) pel termoparell 11.

A la figura 5.25 es pot observar la temperatura assolida per cada termoparell després de 60 s de l'inici de l'incendi, segons els resultats experimentals i el model.

S'han representat els termoparells d'ambdós costats del dipòsit. Evidentment el model dóna resultats totalment simètrics ja que no té en compte l'efecte del vent induït ni el fet que el sistema no sigui simètric. Tal com estan disposats els termoparells, si el sistema i les flames fossin totalment simètrics, dos termoparells situats a la mateixa alçada, a banda i banda del dipòsit —com per exemple el 10 i el 12 o el 9 i el 13—, haurien d'assolir la mateixa

temperatura. A la figura 5.25 es pot comprovar que tot i que s'assemblen força, els valors assolits no són totalment idèntics, sobretot en el cas dels termoparells 3 i 7. Això s'ha d'atribuir d'un banda a les proòpies flames, que presenten oscil·lacions que fan que els dos costats del dipòsit no rebin exactament la mateixa quantitat de calor, però també al fet que a la banda est del dipòsit hi ha una paret reixada que separa el mòdul oest de la resta del mòdul i a la part del darrera (cara nord) una paret sòlida d'acer (a través de la qual surten els cables dels aparells de mesura). Ambdues parets poden absorbir part de la radiació, alhora que dificulten el pas de l'aire cap a les flames.

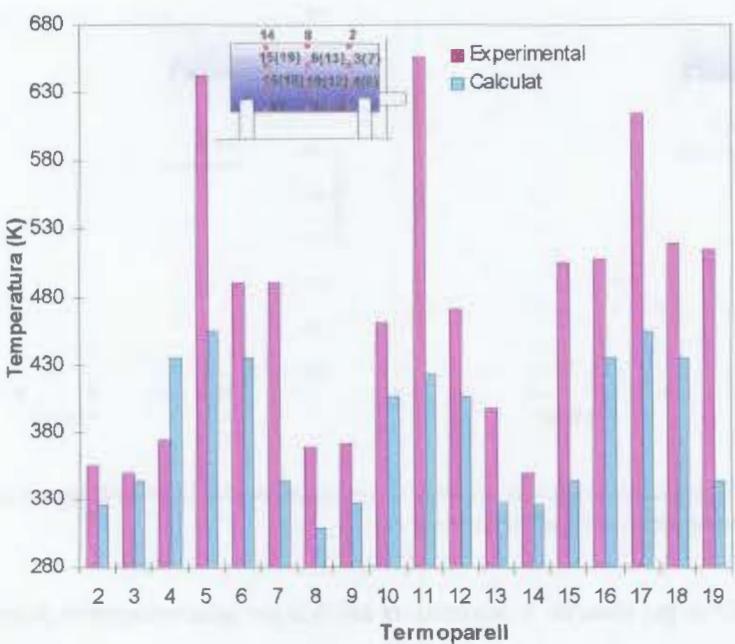


Figura 5.25 Temperatura assolida en diversos termoparells de la superfície del dipòsit. Valors experimentals i calculats segons el model. En l'esquema del dipòsit els números entre parèntesis corresponen als termoparells situats a la cara oest del dipòsit.

Si es comparen els valors de temperatura del dipòsit calculats pel model amb els valors determinats experimentalment es pot observar que la tendència de les dues corbes (fucsia i blava) és la mateixa, augmentant la temperatura des de la part de dalt del dipòsit cap a la part de

baix i essent lleugerament més altes les temperatures de la banda de davant (termoparells 14, 15, 16, 17, 18 i 19) respecte les de la banda del mig (termoparells 8, 9, 10, 11, 12 i 13). Malgrat això, alguns termoparells presenten diferències importants en els valors de temperatura assolits. D'aquests cal destacar els termoparells 5, 11 i 17 que corresponen als tres punts de la part més baixa del dipòsit.

Com ja s'ha dit anteriorment, els resultats obtinguts pel model estan directament associats a la temperatura de flama escollida. A l'Annex-II s'exposa la manera com aquesta s'ha determinat, en primer lloc correlacionant les dades experimentals i després fent la correcció en base a les dades obtingudes dels radiòmetres. El que fan els radiòmetres és mesurar la radiació provenint de la superfície de la flama i per tant la temperatura que s'obté correspon també a la part de la flama que es troba a la superfície. Els termoparells 5, 11 i 17 es troben molt lluny de la superfície de la flama, en una zona on l'aire fred de l'ambient no hi arriba i on la combustió es produeix probablement amb molt menys excés d'aire que no als extrems de la flama. Tot això fa pensar que probablement les temperatures assolides per la flama en aquesta zona són molt més elevades que les estimades per la correlació utilitzada en el model. No obstant, aquest és un efecte difícil d'incloure al model amb la informació de què es disposa actualment i caldria un estudi molt més profundit de l'evolució de les temperatures arreu de la flama per tal que el model pogués predir amb fidelitat l'evolució de les temperatures a tots els punts del dipòsit.

Cal tenir en compte a més que el fet d'estar subestimant les temperatures a la part més baixa del dipòsit repercutiu també en les temperatures assolides en la resta dels punts (debat a la conducció) que per aquest motiu també resultaran més baixes del que en realitat els pertocaria.

A banda d'aquests tres termoparells comentats fins ara, n'hi ha uns altres tres que criden l'atenció: el 7, el 15 i el 19. En aquest cas el model també subestima molt les temperatures assolides pel dipòsit però la raó no és en absolut la mateixa que en el cas anterior. Els termoparells 7, 15 i 19 es troben a la meitat superior del dipòsit, en un punt no gaire allunyat de la superfície de la flama i ben ventilat, per tant les temperatures de flama considerades probablement estan ben estimades. Aquí el que cal notar és que els termoparells 3, 9 i 13 situats

a la mateixa alçada i a una distància inferior a 1 metre del 15 i el 19, tenen unes temperatures molt més baixes (aprox. 120° menys); el cas dels termoparells 3 i 7 encara és més significatiu ja que ambdós són simètrics i per tant haurien de presentar exactament la mateixa temperatura. Això podria fer pensar en un error en la mesura obtinguda per aquests termoparells (en totes les proves passa el mateix) o bé, en què realment i degut a l'efecte del vent aquests punts reben molta més calor que la resta. Ambdues suposicions són difícils de comprovar ja que no es disposa de prou informació i els enregistraments fets amb el video només ofereixen imatges frontals de les flames i el dipòsit.

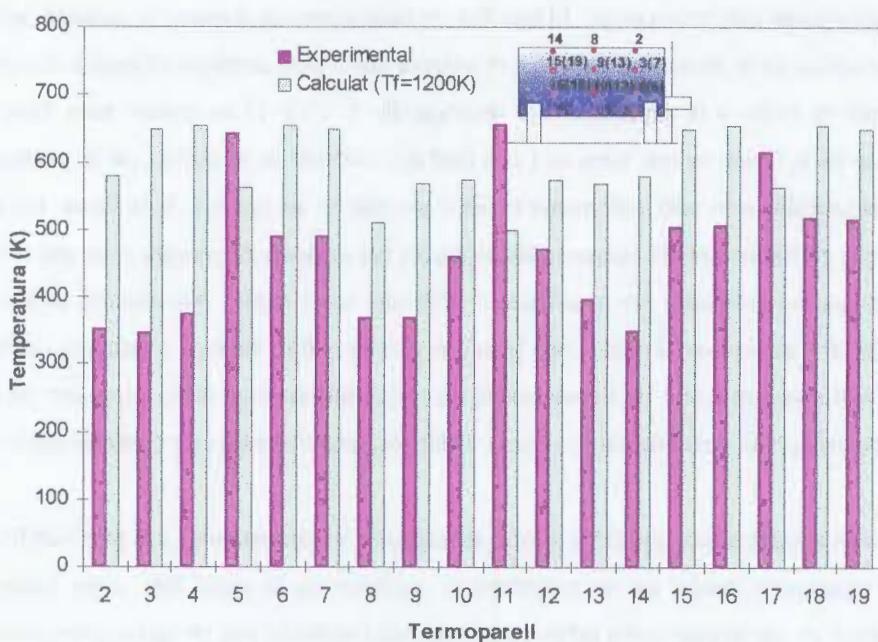


Figura 5.26 Temperatura assolida en diversos termoparells de la superfície del dipòsit. Valors experimentals i calculats segons el model considerant una temperatura de flama constant i igual a 1200 K. En l'esquema del dipòsit els números entre parèntesis corresponen als termoparells situats a la cara oest del dipòsit.

Fins ara les referències que es poden trobar a la bibliografia, pel que fa a l'estudi de les temperatures assolides en dipòsits immersos en flames, o bé analitzen únicament resultats

experimentals, o bé, si modelitzen, el que fan és treballar en l'estat estacionari i a més prenen la temperatura de la flama constant.

La figura 5.26 mostra quins són els resultats assolits pel model si s'agafa la temperatura de la flama constant i igual a 1200 K (que és la temperatura més utilitzada en els treballs en què aquesta es suposa constant i uniforme per a tota la flama). Es pot veure que les diferències amb els resultats experimentals són molt importants, no només en els valors assolits sinó sobretot en la distribució de la temperatura entre els diversos punts del dipòsit.

El gràfic mostra que el dipòsit es troba pràcticament de manera uniforme al voltant de 600 K (de mitjana), quan en realitat la temperatura varia molt d'un punt a l'altre. Cal remarcar també que els experiments es van fer amb el dipòsit buit (cas més desfavorable) quan en realitat això no es dóna mai; per tant la zona que aquí assoleix temperatures més altes (termoparells 10, 11, 12 i 16, 17, 18) seria la que normalment estaria refrigerada internament pel líquid emmagatzemat, essent la temperatura màxima que podria assolir el dipòsit (en el punt més desfavorable) d'uns 400 K.

Les propietats mecàniques de l'acer depenen molt de la temperatura. La temperatura crítica depèn sobretot de la càrrega a la que estigui sotmès el dipòsit i en menor grau de la qualitat de l'acer però normalment es troba en el rang 673-823 K [SCAN,92]. En el cas exposat, a 400 K la resistència de l'acer s'hauria reduït un 5% mentre que a 600 K s'hauria reduït fins un 25%.

CAPÍTOL 6. CONCLUSIONS

Cultures & Counter-cultures

Edited by Michael S. Roth

Volume 12 Number 1 Spring 1994

ISSN 0898-2603

Published quarterly by Cornell University Press

Subscription rates: \$30.00 per volume, \$8.00 per issue

Subscriptions and advertising inquiries should be addressed to Cornell University Press, 115 Robert Treat Place, Ithaca, NY 14850, USA.

Subscriptions and advertising inquiries should be addressed to Cornell University Press, 115 Robert Treat Place, Ithaca, NY 14850, USA.

Subscriptions and advertising inquiries should be addressed to Cornell University Press, 115 Robert Treat Place, Ithaca, NY 14850, USA.

Subscriptions and advertising inquiries should be addressed to Cornell University Press, 115 Robert Treat Place, Ithaca, NY 14850, USA.

Subscriptions and advertising inquiries should be addressed to Cornell University Press, 115 Robert Treat Place, Ithaca, NY 14850, USA.

Subscriptions and advertising inquiries should be addressed to Cornell University Press, 115 Robert Treat Place, Ithaca, NY 14850, USA.

Subscriptions and advertising inquiries should be addressed to Cornell University Press, 115 Robert Treat Place, Ithaca, NY 14850, USA.

Subscriptions and advertising inquiries should be addressed to Cornell University Press, 115 Robert Treat Place, Ithaca, NY 14850, USA.

Subscriptions and advertising inquiries should be addressed to Cornell University Press, 115 Robert Treat Place, Ithaca, NY 14850, USA.

Subscriptions and advertising inquiries should be addressed to Cornell University Press, 115 Robert Treat Place, Ithaca, NY 14850, USA.

CAPÍTOL 6. CONCLUSIONS

1. L'anàlisi històrica duta a terme ha posat de manifest l'elevada incidència dels incendis: en el 30% dels accidents ocorreguts en instal·lacions industrials i en el transport de mercaderies perilloses hi ha hagut foc. Un dels incendis més freqüents en aquest tipus d'accidents és el de bassals de líquid.
2. Tot i la considerable fluctuació i variació de l'incendi (posició i grandària de les flames) durant les diverses experimentacions efectuades, el tractament de les dades mostra que els resultats (temperatura assolida pels diferents punts del dipòsit) són altament reproduïbles.
3. L'equipament sotmès a l'acció directa de les flames de bassals de foc rep grans fluxes calorífics que poden implicar velocitats d'escalfament molt grans (fins a $1000\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$) o increments de pressió molt elevats.
4. El creixement del foc fins a la seva grandària màxima té lloc (per als diàmetres de bassal estudiats) en un temps aproximat de 1 min. Això estableix un règim transitori, pel que fa a la calefacció de l'equip sotmès a l'incendi, la durada del qual és del mateix ordre de magnitud.
5. En el cas d'equipaments immersos en un bassal de foc, si la grandària de l'equip és relativament gran en comparació amb la del bassal, es produeix un efecte d'obstaculització que redueix el rendiment de la combustió. S'ha definit un paràmetre, denominat *Factor d'obstaculització*, per a quantificar aquest efecte.
6. S'ha desenvolupat una correlació per a calcular la temperatura de la flama en funció de l'alçada i el temps. Això permet efectuar la modelització matemàtica de l'incendi durant el règim transitori de forma molt més real.

7. S'ha desenvolupat un model matemàtic del fenòmen que permet determinar la radiació incident en qualsevol punt de la superfície del dipòsit, així com la temperatura assolida pel mateix. El fet de contemplar el règim transitori, amb la temperatura de flama variable amb la posició i el temps, ha millorat considerablement la fiabilitat de les prediccions en comparació amb els altres models existents que adoptaven un valor constant d'aquesta temperatura.
8. El sistema emprat en l'extinció s'ha mostrat altament eficaç. La utilització d'escuma en una primera fase, seguida d'aigua immediatament després permet controlar l'incendi, recobrint la superfície del bassal en un temps relativament curt, i simultàniament refrigerar l'euqip. Això ofereix una via per controlar l'emergència des del primer moment, evitant la propagació de l'incendi.

NOMENCLATURA

ANNE DOROTHY

NOMENCLATURA

a	Al capítol 5, coordenada x del punt P de la superficie del dipòsit, m
a, b, c	Coeficients de l'equació (4.6)
a_i	$i = 0 \div 4$, paràmetres de l'equació (5.1)
a_λ	Coeficient d'absorció, m^{-1}
$A_{i \rightarrow j}$	Al capítol 5, àrees internodals, m^2
c_0	Velocitat de la llum en el buit, $2.9979 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
c_1	Constant de l'equació (1.7), $2\pi h c_0^2 = 3.743 \cdot 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2}$
c_2	Constant de l'equació (1.7), $hc_0/k = 1.4387 \cdot 10^4 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{K}$
c_i	Calor específica del node i , $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
c_p	Calor específica a pressió constant, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$c_{p_{fums}}$	A l'equació (4.15) calor específica a pressió constant del fum, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
CEC	Cubeta est central del mòdul de proves
CEE	Cubeta est externa del mòdul de proves
CEI	Cubeta est interna del mòdul de proves
C_i	producte de la densitat, calor específica i volum del node i , $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$
COC	Cubeta oest central del mòdul de proves
COE	Cubeta oest externa del mòdul de proves
COI	Cubeta oest interna del mòdul de proves
d	A l'equació (2.1) i (4.2) diàmetre del bassal, m
$dA \cos \theta$	Àrea projectada de dA en la direcció $\vec{\Omega}$
$d\epsilon_\lambda$	energia radiant a l'interval de longitud d'ona $\lambda + d\lambda$ que es propaga a través de l'angle sòlid $d\Omega$ de direcció $\vec{\Omega}$
$d_{i \rightarrow j}$	Al capítol 5, distàncies internodals, m
D	A l'equació (1.35) diàmetre del bassal, m

D'	A l'equació (1.39) nou diàmetre de la base de la flama, comprenent el desplaçament, m
D_a	Diàmetre mitjà en el temps per a una fuita instantània, m
D_e	Diàmetre del bassal en funció del temps per a una fuita instantània, m
D_{eq}	Diàmetre d'equilibri per a una fuita contínua, m
D_m	Diàmetre màxim que pot assolir el bassal en una fuita instantània, m
e	Al capítol 5, gruix de la paret del dipòsit, m
E	Poder emissiu total i hemisfèric. A l'equació (1.40) poder emissiu de la flama, W
E_b	Poder emissiu total d'un cos negre, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
$E_{b\lambda}$	Poder emissiu espectral d'un cos negre
E_λ	Poder emissiu espectral
E_m	A l'equació (1.42) poder emissiu promitjat de la superficie de la flama, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
f	A l'equació (1.41) fracció de l'energia de combustió que és alliberada en forma de radiació
F	Factor de visió difusa. A l'equació (5.27) i (5.28) coeficient de l'equació de Crank-Nicholson
g	Acceleració de la gravetat, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
$g(y), h(y)$	A l'equació (5.2) funcions que defineixen el contorn de la flama
h	Constant de Planck, $6.6256 \cdot 10^{-34}$ J·s. A l'equació (4.6) alçada, m
h_1	Distància entre la superficie del bassal i la part inferior del dipòsit, m
h_2	Distància entre la superficie del bassal i la part superior del dipòsit, m
h_3	Distància entre la superficie del bassal i el centre del dipòsit, m
H	A les equacions (2.1) i (4.2) coeficient de convecció, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. A l'equació (2.5) alçada de la flama, m
$I_{b\lambda}$	Intensitat de la radiació espectral per a un cos negre
I_λ	Intensitat de la radiació espectral
k	A l'equació (1.6) constant de Boltzmann, $1.38054 \cdot 10^{-23}$ J·K
k_λ	Gruix òptic o opacitat
K	Coeficient d'extinció, m^{-1} . A l'Equació (3.1) factor K dels ruixadors i polvoritzadors

K_c	A l'equació (2.1) i (4.2) coeficient de conducció, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
$K_{j \leftrightarrow i}$	Conductància entre el node j i el node i , $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
l_m	Distància mitjana de penetració de la radiació, m
L	A l'equació (1.27) distància que ha de recórrer la radiació, m. A l'equació (1.35) alçada de la flama, m. Al capítol 5, llargada del cilindre, m
LII	Límit inferior d'inflamabilitat, %Vol
LSI	Límit superior d'inflamabilitat, %Vol
m_i	A l'equació (2.4) nombre de mols del component i , en fase líquida, mol
\dot{m}	Velocitat de combustió, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
\dot{m}''	Velocitat de combustió, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$
\dot{m}_{fums}	Cabal de fum generat durant l'incendi, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
\dot{m}_{max}''	Velocitat de combustió màxima (correspondent a un bassal de dimensions infinites), $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
n	A l'equació (2.7) nombre total de categories en què s'han agrupat els registres
\vec{n}	Vector unitari normal a la superficie
n_i	A l'equació (2.4) nombre de mols de component i , en fase de vapor, mol
N	A l'equació (2.4) nombre de components de la mescla
N_i	A l'equació (2.7) nombre de registres continguts dins la categoria i
p	A l'equació (5.21) interval de temps, s
p_c	Pressió parcial del diòxid de carboni a l'atmosfera, Pa
p_w	Pressió parcial del vapor d'aigua a l'atmosfera, Pa
P	A l'equació (2.7) probabilitat acumulada o freqüència d'una determinada categoria. Al capítol 5, punt d'interès pertanyent a la superficie del cilindre
$q_{dA_1-dA_2}$	A l'equació (1.12) potència radiant que abandona dA_1 i incideix directament en dA_2
$q_{dA_1-\text{Semiespai}}$	Potència radiant que abandona dA_1 cap a tot el semiespai.
q_i	$i = 1 \div 2$, Al capítol 5, línies d'intersecció entre el pla tangent a la superficie del dipòsit en el punt P i la superficie que defineix el contorn de la flama
$q_{j \rightarrow i}$	A l'equació (5.21) calor que el node j cedeix al node i , $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$

Q	A les equacions (1.40) i (1.42) flux radiant que arriba a un objecte a una distància x de la flama, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. A les equacions (2.1) i (4.2) calor intercanviada entre la flama i el bassal, W
\dot{Q}_{conv}''	Calor emesa durant l'incendi, en forma de convecció, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
\dot{Q}_{rad}''	Calor emesa durant l'incendi, en forma de radiació, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
Q_t	A l'equació (2.6) calor total alliberada en un incendi, W
\dot{Q}_{tot}''	A l'equació (4.1) calor total emesa per l'incendi, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
$\dot{Q}_{total, teòrica}''$	Calor teòrica que s'alliberaria en l'incendi d'un bassal lliure, si la combustió fos completa, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
$\dot{Q}_{total, real}''$	Calor real alliberada en la combustió d'un bassal lliure, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
$\dot{Q}_{total, real, obst.}''$	Calor real alliberada en la combustió d'un bassal amb un obstacle, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
r	Al capítol 5, distància entre el centre del cilindre i el punt P de la superfície del dipòsit, m
$r(z)$	A l'equació (5.1), funció que defineix el contorn de la flama, m
\vec{r}	A l'equació (1.12) vector que uneix les superfícies A_1 i A_2
R	A l'equació (5.9) radi del dipòsit, m
$R(y, z)$	Pla tangent a un punt P de la superfície del dipòsit
RH	Humitat relativa de l'ambient, %
$R_{obst.}$	Relació d'obstaculització, %
S	Camí que ha de recórrer la radiació, m
S_{bassal}	Superficie del bassal, m^2
$S_{dipòsit}$	Superficie projectada del dipòsit, m^2
t	Temps, s
t_{eq}	Temps necessari per arribar al diàmetre d'equilibri en una fuita contínua, s
t_m	Temps necessari per arribar al diàmetre màxim en una fuita instantània, s
t_s	Durada de la fuita, s
T_a	Temperatura ambient, K

T_{au}	Temperatura d'autoignició, K
T_b	A l'equació (4.4) temperatura del bassal, K
T_f	Temperatura de flama, K
T_{fad}	Temperatura adiabàtica de flama, K
T_i	Temperatura d'inflamació, K
$T_{mitjana}$	Temperatura mitjana de la flama, K
T_s	A l'equació (1.25) temperatura de la font de la radiació (K)
u^*	Velocitat adimensional del vent, $m \cdot s^{-1}$
u_w	Velocitat del vent, $m \cdot s^{-1}$
V	Al capítol 5, volum, m^3
V_L	A l'equació (1.28) quantitat total de combustible vessat, m^3
x	A l'equació (1.40) distància entre l'objecte i la flama, m. Al capítol 5, coordenada horitzontal, m
X	Eix horitzontal
y	Al capítol 5, coordenada vertical, m
\dot{y}	Velocitat de combustió, $m \cdot s^{-1}$
\dot{y}_{max}	Velocitat de combustió per a un bassal de diàmetre infinit, $m \cdot s^{-1}$
Y	Eix vertical
z	Al capítol 5, coordenada horitzontal, m
Z	Eix horitzontal

Lletres gregues

α	Absorbància
α_c	A l'equació (1.24) absorbància del diòxid de carboni
α_w	A l'equació (1.24) absorbància del vapor d'aigua
ΔH_c	Calor de combustió, $J \cdot kg^{-1}$
ΔH_v	Calor de vaporització, $J \cdot kg^{-1}$
Δt	Increment de temps

ΔT_{fums}	Increment de temperatura del fum respecte la temperatura ambient, K
ε	Emitància
ε_c	A l'equació (1.25) emissivitat del diòxid de carboni
ε_w	A l'equació (1.25) emissivitat del vapor d'aigua
ϕ	Al capítol 5, angle entre el vector S i el vector normal a la superfície del dipòsit en el punt P , rad
η	Rendiment de la combustió, %
$\eta_{obst.}$	Rendiment de la combustió amb obstacle, %
λ	Longitud d'ona, μm . A l'apartat 5.5.3, conductivitat tèrmica de l'acer de la paret del dipòsit, $\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$
θ	A l'equació (1.38) angle d'inclinació de la flama, rad. Al capítol 5, angle entre el vector vertical i el vector que uneix el centre del cilindre amb el punt P de la superfície del dipòsit, rad
θ_1	A l'equació (1.12) angle entre el vector normal a la superfície A_1 , \vec{n}_1 , i el vector \vec{r}
θ_2	A l'equació (1.12) angle entre el vector normal a la superfície A_2 , \vec{n}_2 , i el vector \vec{r}
ρ	Reflectància
ρ_a	Densitat de l'aire ambient, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
ρ_i	Densitat del node i , $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
ρ_v	Densitat del vapor combustible, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
σ	Constant d'Stefan-Boltzmann, $5.67\cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$
$\sigma_{s\lambda}$	Coeficient de dispersió, m^{-1}
τ	Transmitància. A l'equació (1.24) transmissivitat atmosfèrica
τ_{cr}	Temps crític
ξ	Factor d'obstaculització, %

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

- [ATAL,71] S. ATALLAH; D.S. ALLAN. "Safe separation distances from liquid fuel fires" Fire Technology, Vol. 7, Num. 1, pp. 47-56 (1971).
- [BAIN,88] B.L. BAINBRIDGE, N.R. KELTNER. "Heat transfer to large objects in large pool fires" J. Hazardous Materials, 20, pp. 21-40 (1988).
- [BEYN,88] G.V. BEYNON, L.T. COWLEY, L.M. SMALL, I. WILLIAMS. "Fire engulfment of LPG tanks: HEATUP, a predictive model" J. Hazardous Materials, 20, pp. 227-238 (1988).
- [BIRK,88] A.M. BIRK. "Modelling the response of tankers exposed to external fire impingement" Journal of Hazardous Materials, 20, pp. 197-225 (1988).
- [BOE,91] RESOLUCIÓN de 30 de gener de 1991. "Directriz Básica para la elaboración y homologación de los Planes Especiales del Sector Químico" BOE núm. 32, 4033-4060. Madrid, 6 de febrero de 1991.
- [BOE,93] REAL DECRETO 1942/1993 del 5 de Noviembre. "Reglamento de instalaciones de protección contra incendios" BOE núm. 298, pp. 35159-35168. Madrid 14 desembre de 1993.
- [BONA,94] LL.A. BONALS; R. RUIZ. *Transmissió de calor. Teoria*. Edicions UPC (1994).
- [BOSO,89] M. BOSONI, R. BRUSONI, C. FIORENTINI, A. LANCIA. "Experimental fire tests on off-shore simulating rig for optimum design of foam/water spray system" 2nd Int. Conference on Fire Safety Engineering. Fire Safety and Loss

- Prevention in Offshore, Petrochemical and Other Hazardous Applications.
Brighton, England, June 1989.
- [CASA,96] J. CASAL; H. MONTIEL; E. PLANAS; S. RODRÍGUEZ; J.A. VÍLCHEZ.
Anàlisi del risc en instal·lacions industrials. Edicions UPC (1996).
- [DAHL,92] M. DAHLBERG. "The SP Industry calorimeter —For rate of heat release measurements up to 10 MW" SP Report 1992:43 (1992).
- [DINE,82] P.F. DINNENO. "Simplified radiation heat transfer calculations from large open hydrocarbon fires" SFPE Technology Report 82-9 (1982).
- [DITA,92] S. DITALI, A. ROVATI, F. RUBINO. "Experimental model to assess thermal radiation from hydrocarbon pool fires" 7th Int. Symp. Loss Prevention and Safety Promotion in Process Industries, Italy, May 1992.
- [FL1,91] SHELL RESEARCH LIMITED. *Oil and Gas Fires. Characteristics and Impact*. Work Package N° FL1 (1991).
- [FRYE,79] L.S. FRYER, R.F. GRIFFITHS. "Worldwide data on the incidence of multiple-fatality accidents" SRD R 149, Safety and Reliability Directorate, UK Atomic Energy Authority, London, April 1979.
- [GORE,91] J. GORE, M. KLASSEN. "Fuel property effects on burning rate and radiative transfer from liquid pool flames"
- [GREG,89] J.J. GREGORY, N.R. KELTNER, R.Jr. MATA. "Thermal measurements in large pool fires" J. Heat Transfer - Transactions of the ASME, Vol. 111, pp. 446-454 (1989).
- [HAAS,90] P. HAASTRUP, L. BROCKHOFF. "Severity of accidents with hazardous materials. A comparison between transportation and fixed installations" J. Loss Prev. Process Ind., 3, pp. 395-405 (1990).

- [HESK,84] G. HESKESTAD; "Engineering relations for fire plumes" Fire Safety Journal N° 7 (1984).
- [HOTT,67] H.C. HOTTEL; A.F. SAROFIM. *Radiative Transfer*. McGraw-Hill, Inc. (1967).
- [INGA,92] H. INGASON, H. PERSSON, A. RYDERMAN. "Foam sprinklers as a replacement for halon in engine room" SP Report 1992:37, Swedish National Testing and Research Institute (Fire Technology section) (1992).
- [IRI,91] "Fixed water spray and deluge protection for oil and chemical plants" IRI Information IM.12.2.1.2, june 1991.
- [KELT,90] N.R. KELTNER; V.F. NICOLETTE; N.N. BROWN; B.L. BAINBRIDGE. "Test unit effects on heat transfer in large fires" Journal of Hazardous Materials, 25, pp. 33-47 (1990).
- [KOKK,90] M. KOKKALA. "Extinguishing of liquid fires with sprinklers and water sprays, analysis of the test results" Tutkimuksia Forskningsrapporter Research Report 696, Technical Research Centre of Finland, ESPOO 1990.
- [KOLB,83] W.M.KOLB. *Curve fitting for programable calculators*. 2nd. Edition. IMTEC (1983).
- [LEES,86] F.P. LEES. *Loss Prevention in the Process Industries. Vol I*. Butterworth & Co, Ltd (1986).
- [LESL,91] I.R.M. LESLIE; A.M. BIRK "State of the art review of pressure liquefied gas container failure modes and associated projectile hazards" Journal of Hazardous Materials, 28, pp. 329-365 (1991).

- [MANG,92] G. MANGIALAVORI, F. RUBINO "Experimental tests on large hydrocarbon pool fires" 7th Int. Symp. Loss Prevention and Safety promotion in Process Ind., Italy, May 1992.
- [MHID,94] UK Atomic Energy Authority. "MHIDAS (Major Hazard Incident Data Service)" CD-ROM version, Silver Platter (ref. OSH-ROM databank), june 1994.
- [MODA,81] A.T. MODAK. "The burning of large pool fires" Fire Safety Journal, 3, pp. 177-184 (1981).
- [MOOD,88] K. MOODI. "Experiments and modelling: An overview with particular reference to fire engulfment" J. Hazardous Materials, 20, pp. 149-175 (1988).
- [MOODI,88] K. MOODI, L.T. COWLEY, R.B. DENNY, L.M. SMALL, I. WILLIAMS. "Fire engulfment tests on a 5 tonne LPG tank" J. Hazardous Materials, 20, pp. 55-71 (1988).
- [MUDA,84] K.S. MUDAN. "Thermal radiation hazards from hydrocarbon pool fires" Prog. Energy Combust. Sci. Vol. 10, pp. 59-80 (1984).
- [NFPA-13] NFPA 13: "Standard for the Installation of Sprinkler Systems" (1987).
- [NFPA-15] NFPA 15: "Standard for Water Spray Fixed Systems for Fire Protection" (1985).
- [NFPA-16] NFPA 16: "Standard on Deluge Foam-Water Sprinkler and Foam-Water Spray Systems" (1986).

- [ROBE,82] A.F. ROBERTS, D.P. CUTLER, K. BILLINGE. "Fire engulfment trials with LPG tanks with a range of fire protection methods" 4th Int. Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, Vol. 3, pp. D1-D10 (1982).
- [RØME,93] H. RØMER, L. BROCKHOFF, P. HAASTRUP, H.J. STYHR PETERSEN. "Marine transport of dangerous goods. Risk assessment based on historical accidents data" J. Loss Prev. Process Ind., 6, pp. 219-225 (1993).
- [SCAN,92] *Handbook for fire calculations and fire risk assessment in the process industry.* Scandpower-Sintef (1992).
- [SCHO,88] W. SCHOEN, B. DROSTE. "Investigations of water spraying systems for LPG storage tanks by full scale fire tests" J. Hazardous Materials, 20, pp. 73-82 (1988).
- [SI 611/78] SI n° 611: "Fire-Fighting Equipment Regulations - Offshore Installations" Regulations 1978.
- [SIEG,92] R. SIEGEL; J.R. HOWELL. *Thermal Radiation Heat Transfer.* Hemisphere Publishing Corporation (1992).
- [STEN,87] J.P. STENSAAS, P.J. HOVDE, B.F. MAGNUSSSEN. "Physical modelling of enclosed pool fires —Development of empirical correlations"
- [TECSA,89] "Prove sperimentali di sistemi di rilevazione e di estinzione di incendio per baie di carico di autobotti per prodotti petroliferi" Tecsa for AGIP PETROLI SpA, Roma. Produced by TECSA Laboratori Sperimentali Levate, Final Report 3.5018, Novembre 1989.
- [THOM 63] P.H. THOMAS; "The size of flames from natural fires" 9th Int. Combustion Symposium, Combustion Inst., Pittsburgh, PA, pp. 844-859 (1963).

- [TUNÇ,84] M. TUNÇ, J.E.S. VENART. "*Incident radiation from an engulfing pool fire to a horizontal cylinder*" Fire Safety Journal, 8 pp. 81-87 (1984).
- [TUNÇ,85] M.M. TUNÇ, A. KARAKAS. "*Three-dimensional formulation of the radiant heat flux variation on a cylinder engulfed in flames*" Journal of Heat Transfer - Transacciones de la ASME, Vol. 107, pp.949-952 (1985).
- [UNE 23-501] UNE 23-501 a UNE 23-507: "*Sistemas fijos de agua pulverizada*".
- [UNE 23-521] UNE 23-521 a UNE 23-526: "*Sistemas de extinción por espuma física de baja expansión*".
- [UNE 23-541] UNE 23-541 a UNE 23-544: "*Sistemas fijos de extinción por polvo*".
- [UNE 23-590] UNE 23-590 a UNE 23-597: "*Sistemas de rociadores automáticos de agua*".
- [VACH 86] M. VACHON; M. CHAMPION; "*Integral model of a flame with large buoyancy effects*" Combustion and Flame, 63, pp. 269-278 (1986).
- [VILC,95] J.A. VILCHEZ, S. SEVILLA, H. MONTIEL, J. CASAL. "*Historical analysis of accidents in chemical plants and in the transportation of hazardous materials*" J. Loss Prev. Process Ind. Vol. 8, Num. 2, pp. 87-96 (1995).
- [WIGH 94] R. WIGHUS; "*Fires on Offshore process installations*" J. Loss Prev. Process Ind., Vol. 7, nº 4 (1994)
- [WILC 75] D.C. WILCOX; "*Model for fires with low initial momentum and nongray thermal radiation*" AIAA Journal, 13, Nº 3, pp. 381-386 (1975).
- [YAMA,87] T. YAMAGUCHI, K. WAKASA. "*Oil pool fire experiment*"

**ANNEX I. INFORMACIÓ SOBRE LES PROVES
DUTES A TERME DURANT LA FASE
EXPERIMENTAL**

to you all now. Good-bye.

ANNEX I. INFORMACIÓ SOBRE LES PROVES DUTES A TERME DURANT LA FASE EXPERIMENTAL

Al capítol 3 s'ha donat la informació corresponent a les proves fetes amb bassals de foc, però a més d'aquestes també es dugueren a terme proves amb dolls de foc, incendis en moviment, etc. Atès que en aquesta tesi només s'ha treballat amb els incendis de bassals, la informació relativa a la resta de proves realitzades s'ha detallat en aquest annex.

Incendis de dolls de líquid (Proves nº 20 a nº 38)

La vàlvula de sortida del doll es troba a la biga que hi ha entre les cubetes EIT i ECT, a una altura d'1.2 m des de la base del mòdul. A la taula I.1 es mostren les característiques d'aquestes proves.

Incendis de dolls de líquid en brides (Proves nº 39 a nº 44)

Aquest tipus d'incendi es simulà fent sortir el combustible a una pressió de 9 bar per una brida de la bomba que s'havia deixat fluixa (vegeu la taula I.2).

Incendis de dolls de líquid (Proves nº 45 a nº 65)

Continuació dels incendis de dolls de líquid. Similars als anteriors (vegeu la taula I.3).

Incendis de dolls de gas (Proves nº 66 a nº 71)

En aquest cas el combustible utilitzat és el propà, però la vàlvula de sortida del doll és la mateixa que pels dolls de líquid i es troba en la mateixa posició. Només pels dolls que es fan

Incendis de dolls de líquid incident sobre el cilindre i el rack de canonades (Proves nº 72 a nº 82)

Pels dolls incident sobre el cilindre la vàlvula es troba situada entre les cubetes WIT i EIT, al centre de l'eix Nord/Sud i a una altura de 0.7 m, de manera que el doll incideixi directament sobre l'estructura del dipòsit.

En el cas dels dolls incident sobre el rack de canonades, la vàlvula es troba situada entre les cubetes EIT/ECT, al centre de l'eix Nord/Sud i a una altura d'1.3 m i inclinada a 65° per dirigir-la cap al rack (vegeu la taula I.5).

Incendis en moviment (Proves nº 83 a nº 85)

Per aquestes proves es va col·locar una mànega al sostre, just damunt la cubeta WCT (i per tant del cilindre). El combustible es vessava de manera que incidís en el cilindre i acabés formant un bassal. La ignició es provocà a la part superior del cilindre. La taula I.6 mostra les característiques d'aquestes proves.

Taula I.1 Resum de les característiques de les proves 20 a 38

Prova nº	Comb.	Ruiador polvoritzador	Factor K	Cabal aplicació (l·min ⁻¹ ·m ⁻²)	Cabal total (l·min ⁻¹)	Pressió (bar)	Temps de preignició (s)
20	HE	1 SPK0/125°	80	10.2	132	2.7	30
21	HE	1 SPK0/125°	80	10.2	132	2.7	90
22	HE	2 SPK0/125°	80	20.4	264	2.7	30
23	HE	2 SPK0/125°	58.8	20.4	264	5.0	30
24	HE	3 SPK0/125°	58.8	30.6	396	5.0	30
25	HE	2 SPK1/90°	82.6	20.4	264	2.6	30
26	HE	2 SPY0/90°	74.9	20.4	264	3.1	30
27	HE	2 SPK0/125°	38.2	10.2	132	3.0	30
28	HE	2 SPK0/125°	58.8	15.3	198	2.8	30
29*	HE	2 SPK0/125°	80	20.4	264	2.7	30
30**	HE	2 SPK0/125°	80	20.4	264	2.7	30
31	HE	3 SPK0/125°	58.8	30.6	396	5.0	30
32	HE	1 SPK0/125° 1+1 SPY0/90°	80 37.5	10.2+ 10.2	264	2.7	30
33	HE	1 SPK0/125 1+1SPK0/125°	80 38.2	10.2+ 10.2	264	2.7	30
34	HE	1 SPK1/90° 1+1SPY0/90°	82.6 37.5	10.2+ 10.2	264	2.6	30
35	HE	2 SP0/125° 1+1SPY0/90°	80 37.5	20.4+ 10.2	396	2.7	30
36	HE	1 SPK0/90° 1+1SPY0/90°	80 37.5	10.2+ 10.2	264	2.7	30
37	KE	2 SPK0/125°	80	20.4	264	2.7	30
38	KE	3 SPK0/125°	58.8	30.6	396	5.0	30

En tots els casos la pressió del combustible és de 5.4 bar i el cabal de 0.2 kg·s⁻¹, exceptuant : * cabal de 0.25 kg·s⁻¹ i pressió de 6.0 bar; ** Cabal de 0.25 kg·s⁻¹ i pressió de 7.3 bar.

Taula I.2 Resum de les característiques de les proves 39 a 44.

<i>Prova nº</i>	<i>Combust.</i>	<i>Ruixador polvoritzador</i>	<i>Factor K</i>	<i>Cabal aplicació (l·min⁻¹ m⁻²)</i>	<i>Cabal total (l·min⁻¹)</i>	<i>Pressió Comb. (bar)</i>	<i>Cabal Comb. (kg·s⁻¹)</i>
39	HE	1 SPK0/125°	80	10.2	132	5.8	0.25
40	HE	1 SPK0/125°	80	10.2+	264	5.5	0.27
		1+1SPY0/90°	37.5	10.2			
41	HE	1 SPK0/90°	80	10.2+	264	5.7	0.27
		1+1SPY0/90°	37.5	10.2			
42	HE	1 SPK1/90°	82.6	10.2+	264	6.0	0.25
		1+1SPY0/90°	37.5	10.2			
43	KE	1 SPK0/125°	80	10.2+	264	7.7	0.33
		1+1SPY0/90°	37.5	10.2			0.33
44	KE	1 SPK0/125	80	10.2+	264	7.4	
		1+1SPY0/90°	37.5	10.2			

El temps previ a l'extinció és en tots els casos de 30 s i la pressió al ruixador de 2.7 bar

Taula I.3 Resum de les característiques de les proves 45 a 65.

Prova nº	Combust.	Ruixador Polvoritzador	Factor K	Cabal aplicació (l·min ⁻¹ ·m ⁻²)	Cabal total (l·min ⁻¹)	Pressió (bar)
45	KE	2 SPKO/125°	58.8	20.4	264	5.0
46	KE	2 SPK1/90°	82.6	20.4	264	2.6
47	KE	2 SPKO/90°	80	20.4	264	2.7
48	KE	2 SPY0/90°	74.9	20.4	264	3.1
49	KE	2 SPKO/125°	80	20.4+	396	2.7
		1+1SPY0/90°	37.5	10.2		
50	HE	2 SPKO/90°	80	20.4	264	2.7
51*	HX	2 SPKO/125°	80	20.4	264	2.7
52*	HX	3 SPKO/125°	58.8	30.6	396	5.0
53*	HX	2 SPKO/125°	58.8	20.4	264	5.0
54*	HX	2 SPK1/90°	82.6	20.4	264	2.6
55*	HX	2 SPKO/90°	80	20.4	264	2.7
56*	HX	2 SPY0/90°	74.9	20.4	264	3.1
57*	HX	2 SPKO/125°	80	20.4+	396	2.7
		1+1SPY0/90°	37.5	10.2		
58*	HX	2 SPKO/125°	80	20.4	264	2.7
59*	HX	3 SPKO/125°	58.8	30.6	396	5.0
60	KE	3 SPKO/125°	58.8	30.6	396	5.0
61	KE	2 SPKO/125°	80	20.4	264	2.7
62	HE	2 SPKO/125°	80	20.4	264	2.7
63	HE	3 SPKO/125°	58.8	30.6	396	5.0
64	HE	1 SPKO/125°	99.5	20.4	264	7.0
65	HE	1 SPK1/90°	114.9	20.4	264	5.3

El temps previ a l'extinció és per a totes les proves de 30 s i la pressió del combustible de 5.4 bar.

* Per aquestes proves, el cabal de combustible és de 0.19 kg·s⁻¹; la resta tenen totes un cabal de 0.2 kg·s⁻¹.

Taula I.4 Resum de les característiques de les proves 66 a 71.

Prova nº	Ruixador polvoritzador	Factor K	Cabal aplicació (l·min ⁻¹ ·m ⁻²)	Cabal total (l·min ⁻¹)	Pressió (bar)
66	2 SPK0/125°	80	20.4	264	2.7
67	2 SPK1/90°	82.6	20.4	264	2.6
68	1 SPK0/125°	80	10.2	132	2.7
69	1 SPK1/90°	82.6	10.2	132	2.6
70	1 SPK0/125°	99.5	14.2	184	3.4
71	1 SPK0/125°	99.5	14.2	184	3.4

El cabal de propà és en totes les proves de $0.06 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ i el temps previ a l'extinció de 30 s.

Taula I.5 Resum de les característiques de les proves 72 a 82.

Prova nº	Ruixador polvoritzador	Factor K	Cabal aplicació (l·min ⁻¹ ·m ⁻²)	Cabal total (l·min ⁻¹)	Pressió (bar)
72	2 SPK0/125°	80	14.2+	296	2.4
	1 SPY0/90°	24.4			
73	2 SPK0/125°	80	20.4+	296	2.4
	1 SPY0/90°	24.4			
74	2 SPK0/125°	80	14.2+	428	2.4
	1 SPY0/90°	24.4			
	1+1SPY0/90°	37.5			
75*	2 SPK0/125°	80	14.2+	428	2.4
	1 SPY0/90°	24.4			
	1+1SPY0/90°	37.5			
76	1+1SPK0/125°	99.5	14.2+	418	3.4
	1 SPY0/90°	24.4			
77	2 SPK0/125°	80	14.2+	428	2.4
	1 SPY0/90°	24.4	1		
	1+1SPY0/90°	37.5			
78	2 SPK0/125°	80	4.2	246	2.4
79	2 SPK0/125°	80	14.2+	296	2.4
	1 SPY0/90°	24.4			
80	2 SPK0/125*	80	14.2+	346	2.4
	2 SPY0/90°	24.4			
81	2 SPK0/125°	80	14.2+	396	2.4
	3 SPY0/90°	24.4			
82	2 SPK0/125°	80	14.2+	396	2.4
	3 SPY0/90°	24.4			

El cabal de combustible és $0.2 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ i la pressió 5.4 bar, en tots els tests excepte: * cabal: $0.32 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ i pressió: 6.5 bar. El temps previ a l'extinció és de 30 s per a totes les proves.

Taula I.6 Resum de les característiques de les proves 83 a 85.

Prova nº	Ruixador Polvoritzador	Factor K	Cabal aplicació (l·min ⁻¹ m ⁻²)	Cabal total (l·min ⁻¹)	Pressió (bar)
83	2 SPK0/125°	80	14.2	296	2.4
	1 SPY0/90°	24.4			
84	2 SPK0/125°	80	14.2	428	2.4
	1 SPY0/90°	24.4			
	1+1SPY0/90°	37.5			
85	2 SPK0/125°	80	14.2	428	2.4
	1 SPY0/90°	24.4			
	1+1SPY0/90°	37.5			

El cabal de combustible és per tots els tests de 0.12 kg·s⁻¹ i la pressió 0.5 bar. El temps previ a l'extinció és per a tots els tests de 30 s.

**ANNEX II. DETERMINACIÓ DE LA TEMPERATURA
DE FLAMA EN FUNCIÓ DEL TEMPS I
L'ALÇADA**

АДДРАСОВАНІ ВІД ОБРАЗИЩЕННЯ ПІДПІДХІДІ

І АДРЕСОВАНІ ОБРАЗИ ЗІ СПІЛУЧЕНІМ

ІДЕНТИЧНОСТІ

ANNEX II. DETERMINACIÓ DE LA TEMPERATURA DE FLAMA EN FUNCió DEL TEMPS I L'ALÇADA

En aquest annex es detalla el càlcul seguit per a determinar la correlació de la temperatura de flama en funció del temps i l'alçada, tant pels bassals d'hexà de 4 m² com pels de querosè de 12 m².

En ambdós casos es disposava de 4 punts de mesura a 3 alçades diferents (vegeu la figura 3.6), corresponents als termoparells 21, 22, 23 i 24 situats a la cara externa del dipòsit.

Per la forma de les corbes es va veure que corresponen a la recíproca d'una hipèrbola, que té una equació general del tipus [KOLB83]:

$$y = \frac{x}{a \cdot x + b} \quad (\text{II.1})$$

Ni x ni y poden ser igual a zero i és aplicable quan es disposa de tres o més punts. Per tal d'estimar els coeficients d'aquesta equació s'utilitzen les següents equacions:

$$\begin{aligned} A &= \sum \frac{1}{x_i} & B &= \sum \frac{I}{x_i^2} & C &= \sum \frac{I}{y_i} & D &= \sum \frac{I}{y_i^2} \\ E &= \sum \frac{1}{x_i \cdot y_i} & N &= n & F &= N \cdot B - A^2 \end{aligned} \quad (\text{II.2})$$

on x_i i y_i són els valors associats a cada punt i n el número total de punts. Aleshores els coeficients de l'equació (II.1) es calculen:

$$\begin{aligned} a &= \frac{B \cdot C - A \cdot E}{F} \\ b &= \frac{N \cdot E - A \cdot C}{F} \end{aligned} \quad (\text{II.3})$$

El coeficient de regressió d'aquesta corba es determina a partir de l'equació següent:

$$RR = \frac{a \cdot C + b \cdot E - C^2 / N}{D - \frac{C^2}{N}} \quad (\text{II.4})$$

A continuació es detallen els càlculs pels dos tipus de bassal.

II.1 Bassal d'hexà de 4 m²

Taula II.1 Dades de temperatura segons el temps a diferents alçades pels bassals d'hexà de 4 m²

Alçada sobre el bassal (m)					
0.72		1.32		1.92	
Temps (s)	Temperatura (K)	Temps (s)	Temperatura (K)	Temps (s)	Temperatura (K)
4.4	293	4.4	293	4.4	293
5.9	373.6	5.9	335.4	5.9	296.3
11.9	471.5	11.9	372.4	11.9	313.8
17.9	609	17.9	378.3	17.9	336.4
23.9	721.2	23.9	451.7	23.9	374.6
29.9	798.3	29.9	521.3	29.9	412.3
35.9	852.4	35.9	576.5	35.9	448.3
41.9	889.8	41.9	633.8	41.9	493.3
47.9	913.2	47.9	683.8	47.9	545
53.9	936.7	53.9	727.1	53.9	610.3
59.9	922.9	59.9	741.3	59.9	647.1

Ja s'ha vist al capítol 4 que les quatre proves fetes amb bassals d'hexà de 4 m^2 (provees 12, 13, 14 i 15) eren totalment reproductibles durant els primers 60 s, així aquí s'ha promitjat per a cada alçada el valor de temperatura obtingut a cada prova. Les dades obtingudes així són les de la Taula II.1.

Per a cada alçada s'han aplicat les equacions (II.2) a (II.4) que permeten determinar els coeficients de la correlació escollida. Els valors obtinguts s'exposen a la taula següent:

Taula II.2 Valors obtinguts d'aplicar les equacions (II.2) a (II.4)

Equació	Paràmetre	Alçada sobre el bassal (m)		
		0.72	1.32	1.92
I.2	A	7.20E-01	2.39E-01	1.83E-01
	B	9.58E-02	8.39E-03	5.27E-03
	C	1.80E-02	1.43E-02	1.44E-02
	D	3.56E-05	2.69E-05	3.05E-05
	E	1.72E-03	4.69E-04	3.98E-04
	N	11	8*	7*
I.3	a	9.15E-04	7.71E-04	8.68E-04
	b	1.11E-02	3.39E-02	4.53E-02
I.4	RR	0.98	0.99	0.96

* Els primers punts no s'han pres en consideració ja que les flames no hi arriben bé i no hi ha variació de temperatura.

Així les correlacions obtingudes són:

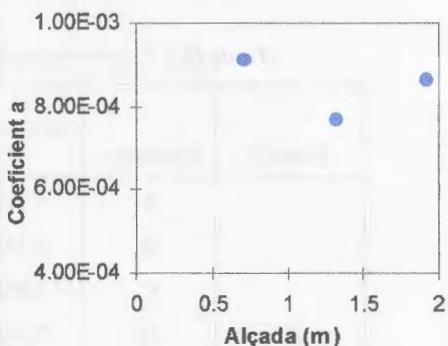
$$T_{flama}(t, h = 0.72) = \frac{t}{0.000915 \cdot t + 0.01107} \quad (\text{II.5})$$

$$T_{flama}(t, h = 1.32) = \frac{t}{0.000771 \cdot t + 0.0339} \quad (\text{II.6})$$

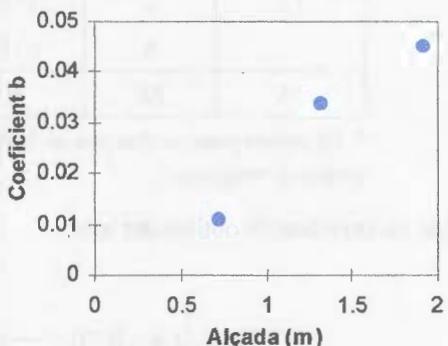
$$T_{flama}(t, h = 1.92) = \frac{t}{0.000868 \cdot t + 0.0453} \quad (\text{II.7})$$

Una vegada s'han determinat les tres correlacions en funció del temps, cal correlacionar els respectius coeficients en funció de l'alçada per tal d'obtenir finalment una sola equació en funció del temps i l'alçada. Les taules i gràfics següents mostren els coeficients en funció de l'alçada.

Alçada (m)	Coeficient a
0.72	9.15E-4
1.32	7.71E-4
1.92	8.68E-4



Alçada (m)	Coeficient b
0.72	0.011067
1.32	0.03392
1.92	0.04529



Atès que només es disposa de tres punts, el millor és correlacionar-los linealment. Així s'obté:

$$\begin{aligned} a &= 0.000851 & r &= 0.99 \\ b &= 0.0034 + 0.021 \cdot h & r &= 0.98 \end{aligned} \quad (\text{II.8})$$

Finalment doncs s'obté:

$$T_{flama}(t, h) = \frac{t}{0.000851 \cdot t + 0.021 \cdot h + 0.0034} \quad (\text{II.9})$$

A la figura II.1 es pot veure el gràfic de temperatura segons el temps per a l'alçada 0.72 m on es poden comparar els valors experimentals dels obtinguts a partir de l'equació (II.9).

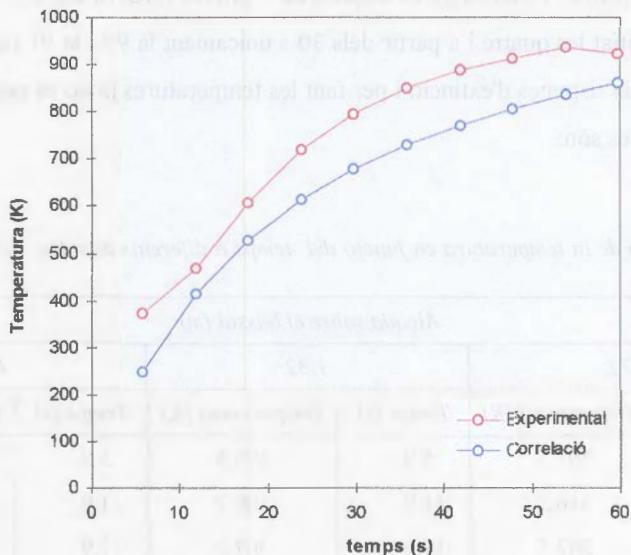


Figura. II.1 Evolució de la temperatura de la flama segons el temps a una alçada de 0.72 m respecte el bassal. Comparació de les dades experimentals i de les deduïdes de la correlació.

A la figura II.1 es pot observar si bé la tendència de les dues corbes és molt semblant, la correlació obtinguda tendeix a subestimar les temperatures de la flama en gairebé 100 K. D'altra banda també cal tenir en compte que la correlació obtinguda no és aplicable per a instants de temps molt propers a zero, ja que en aquest cas la temperatura tendeix a zero i no a la temperatura ambient.

A l'apartat II.3 es proposa la manera de solventar aquests problemes. Cal senyalar també que les temperatures experimentals de què es disposa semblen força baixes si es té en compte les dades publicades per altres autors [GREG,90].

I.2 Bassals de 12 m²

Igual que en el cas anterior, s'ha promitjat per a cada alçada el valor de les temperatures obtingudes a cada prova. També aquí es disposa de 4 proves (provees 88, 89, 90 i 91). Fins a 30 segons s'han promitjat les quatre i a partir dels 30 s únicament la 90 i la 91 (a la 88 i 89 passats 30 s s'enengeaven els sistemes d'extinció i per tant les temperatures ja no es poden utilitzar). Així les dades disponibles són:

Taula II.3 Evolució de la temperatura en funció del temps a diferents alçades. Bassals de querosè de 12 m²

Alçada sobre el bassal (m)					
0.72		1.32		1.92	
Temps (s)	Temperatura (K)	Temps (s)	Temperatura (K)	Temps (s)	Temperatura (K)
5.9	297.5	5.9	295.5	5.9	293.3
11.9	316.3	11.9	309.7	11.9	295.4
17.9	367.5	17.9	367.2	17.9	311.1
23.9	416.1	23.9	441.8	23.9	377.6
29.9	534.8	29.9	571.4	29.9	451.3
35.9	661.2	35.9	697.7	35.9	538.5
41.9	755.6	41.9	794.7	41.9	651.6
47.9	795.3	47.9	861.5	47.9	794.0
53.9	880.9	53.9	895.9	53.9	937.0
59.9	931.4	59.9	921.5	59.9	1030.8

Per a cada alçada s'han aplicat les equacions (II.2) a (II.4), obtenint-se els valors següents:

Taula II.4 Valors obtinguts d'aplicar les equacions (II.2) a (II.4)

Equació	Paràmetre	Alçada sobre el bassal (m)		
		0.72	1.32	1.92
I.2	A	2.39E-01	2.39E-01	2.39E-01
	B	8.39E-03	8.39E-03	8.39E-03
	C	1.33E-02	1.28E-02	1.48E-02
	D	2.47E-05	2.30E-05	3.17E-05
	E	4.54E-04	4.38E-04	5.15E-04
	N	8*	8*	8*
I.3	a	3.09E-04	2.60E-04	8.41E-05
	b	4.53E-02	4.49E-02	5.90E-02
I.4	RR	0.98	0.99	0.98

* Els primers punts no s'han pres en consideració ja que les flames no hi arriben bé i no hi ha variació de temperatura.

Així les correlacions obtingudes pels bassals de 12 m² són:

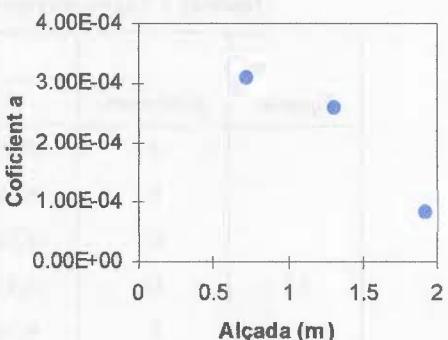
$$T_{flama}(t, h = 0.72) = \frac{t}{0.000309 \cdot t + 0.0453} \quad (\text{II.10})$$

$$T_{flama}(t, h = 1.32) = \frac{t}{0.00026 \cdot t + 0.0449} \quad (\text{II.11})$$

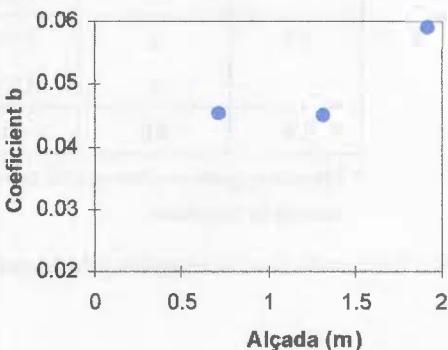
$$T_{flama}(t, h = 1.92) = \frac{t}{0.000084 \cdot t + 0.059} \quad (\text{II.12})$$

Una vegada s'han determinat les tres correlacions en funció del temps, cal igual que en el cas anterior, determinar els respectius coeficients en funció de l'alçada per tal d'obtenir finalment una sola equació en funció del temps i l'alçada:

Alçada (m)	Coefficient a
0.72	3.09E-4
1.32	2.60E-4
1.92	0.84E-4



Alçada (m)	Coefficient b
0.72	0.045304
1.32	0.044860
1.92	0.058976



Atès que, com en el cas anterior, només es disposa de tres punts, el millor és correlacionar-los linealment. Així s'obté:

$$\begin{aligned} a &= 0.000465 - 0.000188 \cdot h & r &= 0.95 \\ b &= 0.0347 + 0.0114 \cdot h & r &= 0.85 \end{aligned} \quad (\text{II.8})$$

Finalment doncs s'obté:

$$T_{flama}(t, h) = \frac{t}{(0.000465 - 0.000188 \cdot h) \cdot t + 0.0114 \cdot h + 0.0347} \quad (\text{II.13})$$

A la figura II.2 es pot veure el gràfic de temperatura segons el temps per a l'alçada 0.72 m on es poden comparar els valors experimentals dels obtinguts a partir de l'equació (II.13).

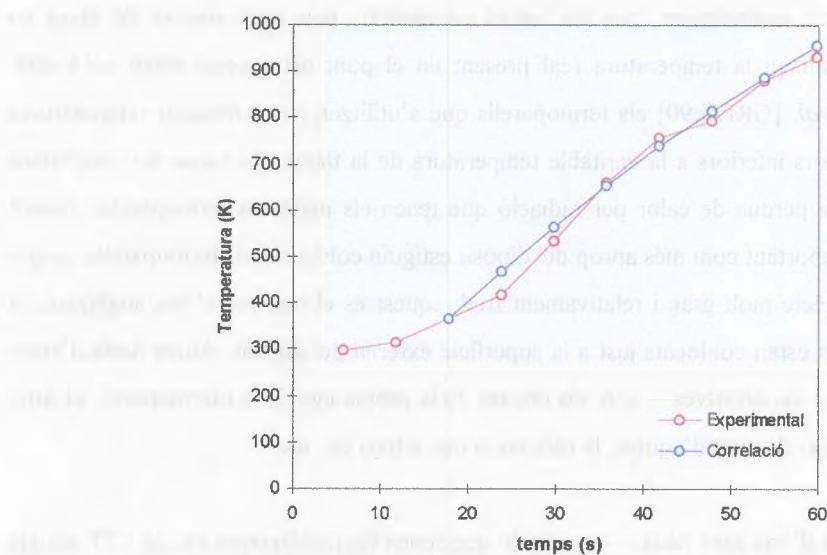


Figura II.2 Evolució de la temperatura de la flama segons el temps a una alçada de 0.72 m respecte el bassal. Comparació de les dades experimentals i de les deduïdes de la correlació.

En aquest cas la correlació obtinguda es correspon molt millor que en el cas anterior amb les dades experimentals. Malgrat tot no es pot aplicar per a instants de temps inferiors a 15 s, ja que els valors que s'obtenen no tenen significat físic.

II.3 Correcció de la temperatura de la flama

Com s'ha vist en els dos apartats anteriors, les correlacions obtingudes s'adapten relativament bé a les dades experimentals obtingudes amb els termòmetres de placa col·locats a la paret externa del dipòsit (vegeu el Capítol 3). Els valors enregistrats però —923 K després d'un minut a una alçada de 0.72 m— semblen molt baixos si es té en compte els valors obtinguts per altres autors [BAIN,88] [GREG,90] (vegeu el Capítol 2) —1150 K després d'un minut a una alçada superior, 1.42 m—.

Tot això fa sospitar, evidentment, que els valors enregistrats pels termòmetres de placa en realitat estan subestiman la temperatura real present en el punt on aquests estan col·locats. Segons Gregory *et al.* [GREG,90] els termoparells que s'utilitzen per a mesurar temperatures de flama dónen valors inferiors a la veritable temperatura de la flama. La causa més important d'aquest error és la pèrdua de calor per radiació que tenen els mateixos termoparells. Essent aquest error més important com més apropi del dipòsit estiguin col·locats els termoparells, ja que el dipòsit és un objecte molt gran i relativament fred; aquest és el cas que s'està analitzant, ja que els termoparells estan col·locats just a la superfície externa del dipòsit. Altres fonts d'error —encara que menys significatives— són: els efectes de la pròpia inèrcia del termoparell, el sutje que es pugui dipositar damunt d'aquest, la calibració que s'hagi fet, etc.

Atès que es disposa d'una altra dada —la radiació que reben els radiòmetres 24, 26 i 27, situats a una certa distància del mòdul— que permet determinar indirectament la temperatura de la flama, s'ha volgut comprovar si realment la temperatura de la flama era tan baixa com mostraven les dades recollides pels termòmetres de placa, o en realitat hi havia un error important en la lectura.

A la figura 3.10 (capítol 3) es mostra la disposició respecte el mòdul dels tres radiòmetres esmentats. Pel càlcul de la temperatura de la flama s'ha escollit el radiòmetre 26 que és el que queda més proper al mòdul oest. La calor que rebi aquest radiòmetre de la flama es pot calcular mitjançant l'expressió següent (vegeu el capítol 1):

$$Q = \tau F \sigma (T_f^4 - T_a^4) \quad (\text{II.14})$$

on:

$$\begin{aligned} \tau &= 2.02(P_w x)^{-0.09} \\ P_w &= \frac{HR}{100} \exp\left(14.4114 - \frac{5328}{T_a(K)}\right) \end{aligned} \quad (\text{II.15})$$

Com que el que és conegut és la calor, aillant la temperatura de flama de l'equació (II.14) s'obté:

$$T_f = \sqrt[4]{\frac{Q}{tF\sigma}} + T_a^4 \quad (\text{II.16})$$

Les dades disponibles per a dur a terme el càlcul es poden veure a la figura següent:

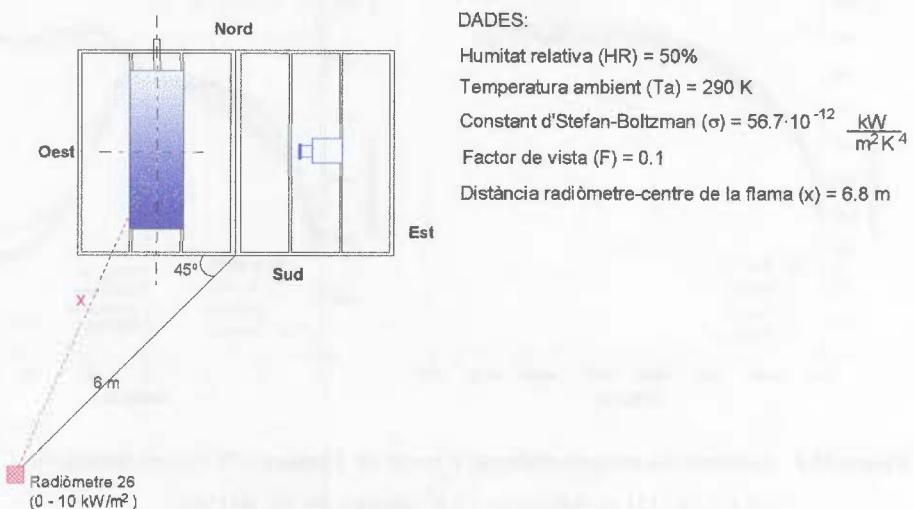


Figura II.3 Disposició del ràdiòmetre 26 respecte el mòdul. Distància d'aquest al centre de la flama. Dades necessàries pel càlcul.

La transmissivitat atmosfèrica es pot determinar a partir de l'equació (II.15) i de les dades disponibles:

$$P_w = \frac{50}{100} \exp\left(14.4114 - \frac{5328}{290}\right) = 962 \text{ Pa}$$

$$t = 2.02(962 \times 6.8)^{-0.09} = \underline{0.9}$$

Amb totes les dades conegeudes es pot tornar a escriure l'equació (II.16) que quedarà:

$$T_f = \sqrt[4]{1.96 \cdot 10^{11} Q + 7.07 \cdot 10^9} \quad (\text{II.17})$$

La temperatura així obtinguda correspon a la temperatura mitjana de la flama, ja que el radiòmetre no mesura la radiació provenint d'un sol punt de la flama sinó la provenint de tota la superfície que està veient. La figura II.4 mostra l'evolució d'aquesta temperatura mitjana calculada a partir de (II.17) i de les dades de Q enregistrades pel radiòmetre.

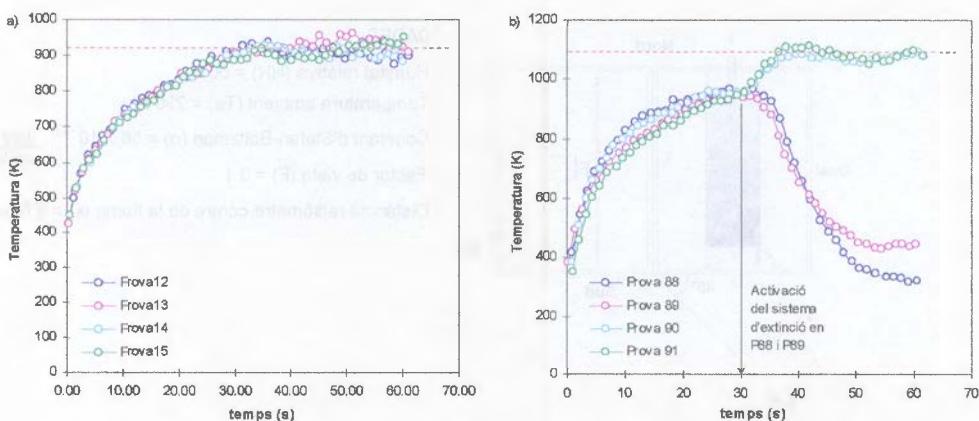


Figura II.4 Temperatura mitjana estimada a partir de l'equació (II.17). a) Bassals de 4 m² (provees: 12, 13, 14 i 15). b) Bassals de 12 m² (provees: 88, 89, 90 i 91)

A mesura que s'arriba a l'estat estacionari les corbes es van estabilitzant. El valor de la temperatura en aquesta zona ha de coincidir amb la temperatura de la flama a una alçada mitjana (aprox. 2 m) transcorreguts uns 60 s, que és quan s'assoleix l'estat estacionari.

Tenint en compte això i el fet que a temps zero la temperatura ha de ser igual a la temperatura ambient, es dedueix que les correlacions de la temperatura s'han de corregir de la següent manera:

$$T_{flama}(t, h) = \frac{t}{0.000851 \cdot t + 0.021 \cdot h + 0.0034} + 290 \quad (\text{II.18})$$

$$T_{flama}(t, h) = \frac{t}{(0.000465 - 0.000188 \cdot h) \cdot t + 0.0114 \cdot h + 0.0347} + 290 \quad (\text{II.19})$$

El següent gràfic (vegeu la figura II.5) mostra les corbes obtingudes aplicant les nova correlació per a bassals de 4 m^2 , per a les alçades $h = 0 \text{ m}$ i $h = 4 \text{ m}$ (alçades mínima i màxima de la flama, respectivament), així com la corba obtinguda de promitjar les dues anteriors. Es pot comprovar que la corba promig és molt semblant a l'obtinguda a través de les dades del radiòmetre (en aquest cas només s'ha posat la corresponent a la prova 13, però les altres eren similars), confirmant la validesa de la nova correlació. En el cas del bassal de 12 m^2 els resultats són similars.

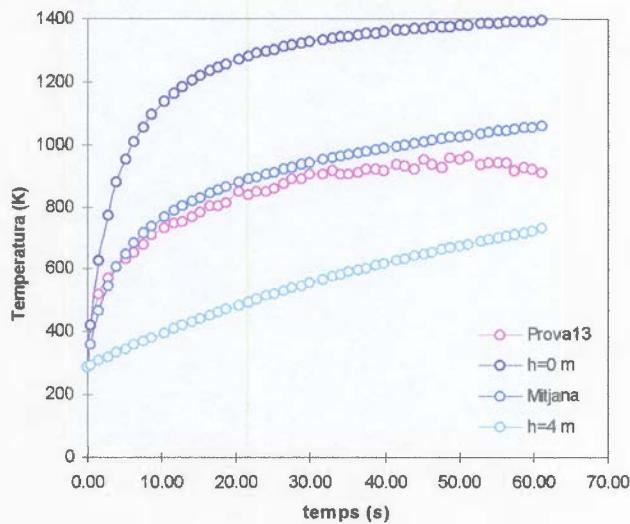


Figura II.5 Gràfic corresponent als bassals de 4 m^2 . Les tres corbes blaves s'han determinat a partir de la correlació de la temperatura de flama, corregida (equació II.18). La corba rosa s'ha determinat a partir de les dades del radiòmetre i correspon a la prova 13.

that can assist in providing information to government agencies. It is noted that such right requires 10 months of review before a government agency can request and receive a copy of the file. In addition, it can be determined from 23 that the record of the investigation is to be given to the court with a prosecution and sentencing file, which will make it easier for the judge "to assess the gravity of the offence, the nature of the prosecution, give weight to the case, [and] provide a basis for sentencing." This would also assist the court in determining whether the TCI file should be made available prior to the issuance of sentencing.

Using a form letter and a cover sheet and sending them to the Canadian government, it is recommended that the government and its law enforcement agencies have the authority to obtain information from the TCI, and to determine whether the TCI file should be made available.

**ANNEX III RESOLUCIÓ NUMÈRICA DEL MODEL DE
RADIACIÓ**

THE READING WORLD

Volume 30

THE READING WORLD

Volume 30

ANNEX III. RESOLUCIÓ NUMÈRICA DEL MODEL DE RADIACIÓ

Actualment, exceptuant el cas en què es vulgui aplicar un mètode numèric poc usual, la majoria d'algoritmes numèrics es troben implementats informàticament i estan disponibles per a qualsevol usuari que els vulgui utilitzar. En aquest annex s'expliquen els algoritmes que s'han utilitzat per a resoldre el model de radiació. En tots els casos s'ha pogut utilitzar alguna de les rutines disponibles al mercat, concretament de les que es troben recollides a *les Numerical Recipes in C* [PRES,94].

III.1 Determinació de la intersecció entre el contorn de la flama i el pla tangent a un punt de la superfície del dipòsit

Donat un punt P , de coordenades (a, b, c) , pertanyent a la superfície del dipòsit, el pla tangent a aquest punt $R(y, z)$, ve definit per la següent equació (vegeu l'apartat 5.3.2):

$$z = \frac{c^2 + b^2 - h_3 \cdot b - (b - h_3) \cdot y}{c} \quad (\text{III.1})$$

On, segons la figura 5.5, h_3 correspon a la coordenada y del centre del dipòsit. Pel que fa a la superfície de la flama, a l'apartat 5.2 es defineix:

$$\begin{cases} g(y): & z = 0.449 + 0.734 \cdot y - 0.383 \cdot y^2 + 0.043 \cdot y^3 & \forall z > 0 \\ h(y): & z = -0.449 - 0.734 \cdot y + 0.383 \cdot y^2 - 0.043 \cdot y^3 & \forall z < 0 \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

La intersecció entre les superfícies (III.1) i (III.2) dóna sempre dues rectes —que s'anomenaran q_1 i q_2 — paral·leles a l'eix x . Per determinar q_1 i q_2 cal trobar les arrels de les dues equacions següents:

$$0.449 + 0.734 \cdot y - 0.383 \cdot y^2 + 0.043 \cdot y^3 = \frac{c^2 + b^2 - h_3 \cdot b - (b - h_3) \cdot y}{c} \quad (\text{III.3})$$

$$-0.449 - 0.734 \cdot y + 0.383 \cdot y^2 - 0.043 \cdot y^3 = \frac{c^2 + b^2 - h_3 \cdot b - (b - h_3) \cdot y}{c} \quad (\text{III.4})$$

Cada equació tindrà com a màxim tres arrels, de les quals n'hi pot haver de reals i d'imaginàries. De les tres arrels que pot tenir cada equació, només dues tindran la coordenada y inferior a l'alçada de la flama i , aquestes són les que corresponen a q_1 i q_2 . Es prendrà sempre com a q_2 l'arrel que tingui la coordenada y més gran i com a q_1 la més petita.

Per determinar les arrels de (III.3) i (III.4) s'ha escollit una rutina numèrica que combina els mètodes de Newton-Raphson i el de bisecció. Excepte en el cas que el problema sigui lineal —i aquí no ho és—, per a determinar les arrels caldrà iterar, independentment que el problema sigui unidimensional o multidimensional.

El mètode de la *bisecció* requereix conèixer un interval on la funció se sap que passa pel zero (per exemple perquè canvia de signe). Aleshores aquest mètode el que fa és avaluar la funció en el punt central de l'interval i comprovar el signe. A cada iteració els límits de l'interval que conté l'arrel es redueixen a la meitat.

Després de n iteracions l'arrel estarà en un interval de dimensions ε_n , i a la següent iteració:

$$\varepsilon_{n+1} = \frac{\varepsilon_n}{2} \quad (\text{III.5})$$

Així si es vol aconseguir una tolerància ε , el nombre d'iteracions que caldrà efectuar és:

$$n = \log_2 \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \quad (\text{III.6})$$

On ε_0 és la dimensió de l'interval inicial. Si ε_0 conté més d'una arrel aleshores aquest mètode només en trobarà una d'elles. Si no hi ha arrels, només una singularitat, el mètode convergirà cap a la singularitat.

Pel que fa al mètode de *Newton-Raphson*, és un dels més utilitzats per a problemes unidimensionals. Aquest mètode requereix avaluar la funció $f(x)$ i la seva derivada $f'(x)$ per a punts x arbitraris. Geomètricament, l'equació consisteix en extendre la línia tangent al punt $f(x_i)$ fins que creui el zero, fixant aleshores el següent punt $f(x_{i+1})$ en l'abcissa d'aquest zero. Algebraicament el mètode deriva de l'expansió en sèrie de Taylor de la funció f al voltant de cada un dels punts:

$$f(x + \delta) \approx f(x) + f'(x) \cdot \delta + \frac{f''(x)}{2} \cdot \delta^2 + \dots \quad (\text{III.7})$$

Per a valors de δ prou petits, els termes d'ordre superior a 1 es poden negligir i per tant $f(x + \delta) = 0$ implicarà:

$$\delta = -\frac{f(x)}{f'(x)} \quad (\text{III.8})$$

Lluny de l'arrel, els termes d'ordre superior a 1 esdevenen importants i aleshores aquest mètode pot donar errors importants. D'altra banda si el punt inicial està molt lluny de l'arrel, enmig pot haver-hi algun màxim o mínim local, en aquest cas el mètode tampoc convergirà (vegeu la figura III.1).

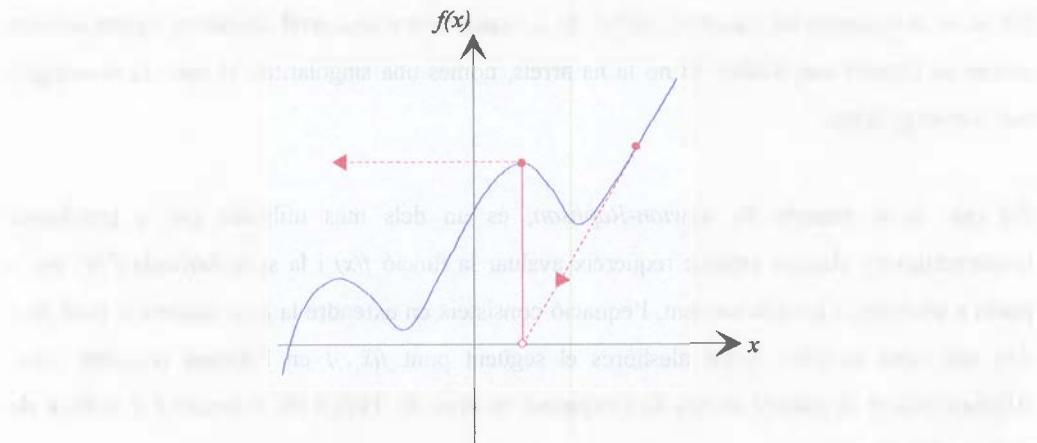


Figura III.1 Exemple d'una funció per a la qual el mètode de Newton-Raphson no convergiria.

L'avantatge d'aquest mètode és que convergeix quadràticament. És a dir que quan s'està aprop de l'arrel, a cada nova iteració el nombre de díigits que esdevenen significatius es duplica.

La rutina que s'ha escollit s'anomena *rtsafe* i utilitza una combinació d'aquests dos mètodes — bisecció i Newton-Raphson—. La rutina utilitza sempre el mètode de Newton-Raphson excepte en el cas que aquest mètode doni la solució fora de límits o mentre no es reduueixi l'interval prou ràpidament.

III.2 Resolució del sistema d'equacions que permet determinar la temperatura a cada un dels nodes del dipòsit

Una vegada plantejat el balanç de calor a cada un dels nodes, el que es té és un sistema de N equacions lineals, tantes com nodes, i N incògnites:

$$A \cdot x = b \quad (\text{III.9})$$

$$\begin{aligned}
 a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \cdots + a_{1N}x_N &= b_1 \\
 a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + \cdots + a_{2N}x_N &= b_2 \\
 a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + \cdots + a_{3N}x_N &= b_3 \\
 \vdots &\quad \vdots \quad \vdots \quad \ddots \quad \vdots \quad \vdots \\
 a_{N1}x_1 + a_{N2}x_2 + a_{N3}x_3 + \cdots + a_{NN}x_N &= b_N
 \end{aligned}$$

Per a resoldre aquest sistema s'ha escollit el mètode anomenat de *descomposició LU*. Aquest mètode suposa que la matriu A es pot descomposar en el producte de dues matrius,

$$L \cdot U = A \quad (\text{III.10})$$

on L és una matriu triangular inferior (només té elements a la diagonal i per sota d'aquesta) i U és una matriu triangular superior (només té elements a la diagonal i per sobre d'aquesta):

$$\begin{bmatrix} \alpha_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & 0 & \dots & 0 \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{N1} & \alpha_{N2} & \alpha_{N3} & \dots & \alpha_{NN} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \beta_{13} & \dots & \beta_{1N} \\ 0 & \beta_{22} & \beta_{23} & \dots & \beta_{2N} \\ 0 & 0 & \beta_{33} & \dots & \beta_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \beta_{NN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2N} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N1} & a_{N2} & a_{N3} & \dots & a_{NN} \end{bmatrix} \quad (\text{III.11})$$

Aquesta descomposició es pot utilitzar per resoldre el sistema (III.9),

$$A \cdot x = (L \cdot U) \cdot x = L \cdot (U \cdot x) = b \quad (\text{III.12})$$

Primer es busca el vector y que verifica:

$$L \cdot y = b \quad (\text{III.13})$$

i aleshores es resol:

$$U \cdot x = y \quad (\text{III.14})$$

L'avantatge de fer aquesta descomposició és que tot i que ara s'han de resoldre dos sistemes d'equacions —(III.13) i (III.14)— en lloc d'un, la seva solució és més trivial ja que es troba de fer una mera substitució. En el cas del sistema (III.13) serà:

$$y_1 = \frac{b_1}{\alpha_{11}} \quad (III.15)$$

$$y_i = \frac{1}{\alpha_{ii}} \left[b_i - \sum_{j=1}^{i-1} \alpha_{ij} \cdot y_j \right] \quad i = 2, 3, \dots, N$$

mentre que per el sistema (III.14) caldrà fer una substitució cap enrera:

$$x_N = \frac{y_N}{\beta_{NN}} \quad (III.16)$$

$$x_i = \frac{1}{\beta_{ii}} \left[y_i - \sum_{j=i+1}^N \beta_{ij} \cdot x_j \right] \quad i = N-1, N-2, \dots, 1$$

D'aquesta manera la resolució del sistema (III.9) només requerirà dur a terme N^2 vegades un bucle que conté una multiplicació i una suma. Evidentment abans d'arribar aquí cal determinar prèviament L i U a partir de A .

El component i,j -èssim del sistema (III.11) serà sempre una suma que començarà:

$$\alpha_{i1}\beta_{1j} + \dots = a_{ij}$$

El nombre de termes de la suma dependrà de si i és més gran, igual o menor que j , de manera que:

$$i < j \Rightarrow \alpha_{i1}\beta_{1j} + \alpha_{i2}\beta_{2j} + \dots + \alpha_{ii}\beta_{ij} = a_{ij} \quad (\text{III.17})$$

$$i = j \Rightarrow \alpha_{i1}\beta_{1j} + \alpha_{i2}\beta_{2j} + \dots + \alpha_{ii}\beta_{jj} = a_{ij} \quad (\text{III.18})$$

$$i > j \Rightarrow \alpha_{i1}\beta_{1j} + \alpha_{i2}\beta_{2j} + \dots + \alpha_{ij}\beta_{jj} = a_{ij} \quad (\text{III.19})$$

Les equacions (III.17), (III.18) i (III.19) formen un conjunt de N^2 equacions i N^2+N incògnites que són les α 's i β 's, ja que la diagonal està representada dues vegades. Per a poder resoldre aquest sistema caldrà agafar N valors arbitraris per a N de les N^2+N incògnites. El que es fa és assignar el valor 1 a les α 's que es troben a la diagonal:

$$\alpha_{ii} \equiv 1 \quad i = 1, \dots, N \quad (\text{III.20})$$

Per últim s'aplica l'algorisme de *CROUT* que permet resoldre el sistema de N^2+N equacions i obtenir com a resultat la matriu:

$$\begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \beta_{13} & \cdots & \beta_{1N} \\ \alpha_{21} & \beta_{22} & \beta_{23} & \cdots & \beta_{2N} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \beta_{33} & \cdots & \beta_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{N1} & \alpha_{N2} & \alpha_{N3} & \cdots & \beta_{NN} \end{bmatrix} \quad (\text{III.21})$$

III.3 Resolució numèrica de la integral tridimensional que permet determinar la radiació incident a cada un dels nodes

A l'apartat 5.3 del capítol 5 s'ha plantejat com determinar la radiació que rep qualsevol punt de la superfície del dipòsit. Básicament el que cal és resoldre una integral triple en la qual, tant la mateixa funció a integrar com els límits d'integració són força complexos. Això fa que, com ja s'ha dit en l'esmentat capítol, sigui impossible de trobar una solució analítica d'aquesta integral i s'hagi de recórrer a l'ús de mètodes numèrics específics.

Hi ha diversos mètodes que permeten resoldre integrals de funcions amb diverses variables en regions de més d'una dimensió, però aquests es poden reduir a dues maneres totalment diferents de resoldre el problema:

1. Integració segons el mètode de Monte Carlo.
2. Integració segons la quadratura de Gauss multidimensional.

Si el problema presenta un contorn molt complicat però l'integrant no té molts pics en petites regions i es pot acceptar una precisió relativament baixa, aleshores el millor és aplicar el mètode de Monte Carlo. Aquest, en la seva forma més senzilla, és fàcil de programar; només li cal conèixer una regió amb un contorn senzill que contingui la regió que es vol integrar i un mètode per determinar si un punt escollit a l'atzar pertany o no a la regió d'integració. El mètode de Monte Carlo el que fa és avaluar la funció en un conjunt de punts escollits a l'atzar i posteriorment fa la integració basant-se en aquesta mostra aleatòria.

Suposant que es prenen N punts a l'atzar, distribuïts uniformement en un volum multidimensional V , els quals s'anomenen x_1, x_2, \dots, x_N , aquest mètode estima la integral d'una funció f sobre el volum multidimensional de la manera següent:

$$\int f dV \approx V \cdot \langle f \rangle \pm V \cdot \sqrt{\frac{\langle f^2 \rangle - \langle f \rangle^2}{N}} \quad (\text{III.22})$$

on $\langle f \rangle$ representa la mitjana aritmètica de f calculada en cada un dels punt de la mostra N :

$$\langle f \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(x_i) \quad \langle f^2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f^2(x_i) \quad (\text{III.23})$$

A l'equació (III.22) el terme que hi ha després del signe *més-menys* correspon a una estimació de l'error fet en l'estimació de la integral com una desviació estàndard. Cal tenir en compte que si per exemple es vol integrar una funció g en una regió W que tingui una forma molt complexa, s'haurà de buscar una regió V que inclogui W i que sigui fàcil de mostrejar. Després es defineix f com una funció que per a tots els punts que pertanyin a W serà igual a g i pels que no hi pertanyin (però que estiguin dins V) serà igual a zero. Cal intentar que V i W estiguin tan junts com sigui possible, ja que quants més zeros tingui f més gran serà el terme d'estimació de l'error (a l'equació (III.22)).

D'altra banda, per integrals amb un contorn relativament simple i funcions *suau*s el problema es pot resoldre mitjançant la quadratura de Gauss multidimensional. En qualsevol cas quan la solució del problema requereix molta exactitud l'únic mètode aplicable és aquest darrer. És per això que per a la resolució numèrica del model de radiació s'ha escollit la quadratura de Gauss; a més cal tenir en compte que els límits d'integració són complexos però es poden simplificar dividint la integral en varíes integrals, cada una de les quals té uns límits molt més senzills. Això és el que s'ha fet a l'apartat 5.3.4, on el volum total en el qual s'ha d'integrar la funció s'ha dividit en dos o tres subvolums amb un límits més senzills.

En general la forma clàssica d'integrar numèricament consisteix en substituir la funció a integrar per un polinomi que la interpoli en un conjunt de punts equiespaiats de l'interval base, prenenent així la integral d'aquest polinomi com una aproximació a la integral que es vol determinar; és el cas de les equacions de Newton-Cotes, depenent del grau que tingui el polinomi interpolador que es prengui s'obtenen diferents mètodes: trapezi, Simpson, etc. Hi ha a més altres mètodes que són versions modificades d'aquests i que en redueixen l'error, com les equacions de Newton-Cotes compostes o l'equació d'Euler-Maclaurin. Pel que fa a la integració Gaussiana, correspondria a aquest tipus d'integració però més sofisticada, ja que permet treballar amb punts que no siguin equiespaiats.

Si es considera una integral del tipus $\int_a^b f(x)w(x)dx$, on $w(x)$ és una funció positiva a $[a,b]$ i es prenen x_0, \dots, x_m punts diferents de $[a,b]$, el polinomi d'interpolació en aquests punts serà:

$$p_m(x) = \sum_{i=0}^m f_i L_i(x) \quad (\text{III.24})$$

on,

$$\begin{aligned} f_i &= f(x_i) \\ L_i(x) &= \prod_{\substack{k=0 \\ k \neq i}}^m \frac{x - x_k}{x_i - x_k} \end{aligned} \quad (\text{III.25})$$

Si s'aproxima la funció f pel polinomi p_m aleshores,

$$\int_a^b f(x)w(x)dx \approx \int_a^b p_m(x)w(x)dx = \sum_{i=0}^m \int_a^b f_i L_i(x)w(x)dx = \sum_{i=0}^m \left(\int_a^b L_i(x)w(x)dx \right) \cdot f_i \quad (\text{III.26})$$

i anomenant $A_i = \int_a^b L_i(x)w(x)dx$ es tindrà,

$$\int_a^b f(x)w(x)dx \approx \sum_{i=0}^m A_i f_i \quad (\text{III.27})$$

Depenent de la funció $w(x)$ i de l'interval $[a,b]$ que es prenguin s'obtindran els diferents casos particulars de les equacions gaussianes:

- Equacions de Gauss-Legendre: $w(x) \equiv 1$; $[a,b] = [-1,1]$

- Equacions de Gauss-Laguerre: $w(x) = e^{-x}$; $[a, b] = [0, +\infty]$
- Equacions de Gauss-Hermite: $w(x) = e^{-x^2}$; $[a, b] = [-\infty, +\infty]$
- Equacions de Gauss-Txebixev: $w(x) = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$; $[a, b] = [-1, 1]$

En general, pels casos més importants els zeros x_k del polinomi i els pesos A_k es poden trobar tabulats a la bibliografia. Pels casos en què la funció $w(x)$ sigui especial aquests paràmetres s'hauran de calcular manualment.

Al principi, la rutina escollida per aquest cas fou *quad3d* que permet resoldre integrals multidimensionals; la manera de resoldre-les s'explica a continuació. En primer lloc, cal definir la regió d'integració donant el límits inferior i superior en x , x_1 i x_2 ; en y per a un determinat valor de x , $y_1(x)$ i $y_2(x)$; i en z per a uns determinats valors de x i y , $z_1(x,y)$ i $z_2(x,y)$; és a dir definir exactament,

$$I \equiv \int_{x_1}^{x_2} dx \int_{y_1(x)}^{y_2(x)} dy \int_{z_1(x,y)}^{z_2(x,y)} f(x, y, z) dz \quad (\text{III.28})$$

Amb això, la rutina el que fa és definir una funció $G(x,y)$ que serà igual a la integral de més endins,

$$G(x, y) \equiv \int_{z_1(x,y)}^{z_2(x,y)} f(x, y, z) dz \quad (\text{III.29})$$

una funció $H(x)$ igual a la integral de $G(x,y)$,

$$H(x) \equiv \int_{y_1(x)}^{y_2(x)} g(x, y) dy \quad (\text{III.30})$$

i així, la solució a la integral I serà,

$$I = \int_{x_1}^{x_2} H(x) dx \quad (\text{III.31})$$

Per resoldre cada una d'aquestes integrals (equacions (III.29) a (III.31)) *quad3d* crida una altra rutina anomenada *qgaus*, una vegada per avaluar la integral de més enfora I , unes quantes vegades per la del mig H i encara més vegades per la de més endins G . D'aquesta manera es troba la solució final.

La rutina *qgaus* és la implementació informàtica de les equacions de Gauss-Legendre, que ja s'han vist prèviament, amb $m=9$, és a dir prenent 10 punts. En aquest cas els polinomis p_m s'anomenen polinomis de Legendre i es poden generar de la següent manera:

$$P_n = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{dx^n} (x^2 - 1)^n$$

$$P_0(x) = 1 \quad (\text{III.32})$$

on $n=m+1$ i els zeros z_k d'aquest polinomi i els pesos A_k es troben a la taula següent:

Taula III.1 Zeros i pesos dels polinomis de Legendre

n	x_k	A_k
10	± 0.97390653	0.06667134
	± 0.86506337	0.14945135
	± 0.67940957	0.21908636
	± 0.43339539	0.26926672
	± 0.14887434	0.29552422

El problema d'utilitzar *quad3d* amb *qgaus* és que el resultat de la integral oscil·la no és prou significatiu (vegeu la figura III.2). Per resoldre aquest problema cal augmentar el nombre de punts *m*. Així, al final, s'ha pres l'algorisme *qgauleg*, que fa el mateix que *qgaus* però permet escollir el nombre de punts, i s'ha construït un nou algorisme, anomenat *qgauleg3d*, amb la mateixa filosofia que *quad3d* però que utilitza *qgauleg* en lloc de *qgaus*.

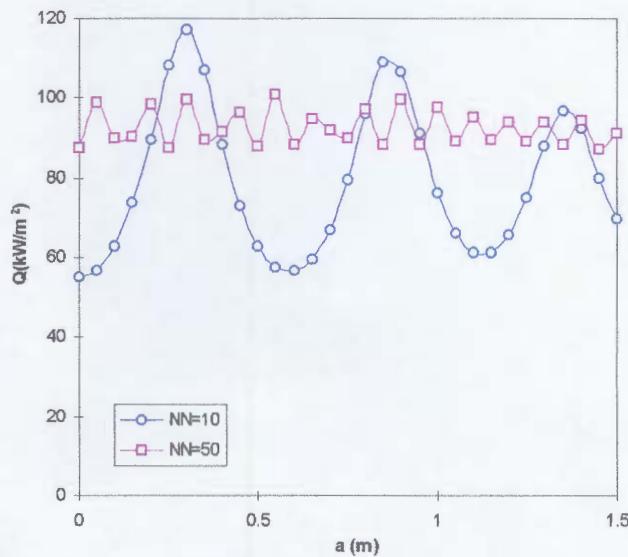


Figura III.2 Resultat obtingut després de resoldre la integral tridimensional. Calor que reben els punts situats a $\theta=180^\circ$ des del centre ($a=0$ m) a l'extrem del dipòsit ($a=1.5$ m), en l'instant $t=60$ s. La corba blava correspon a *qgaus* (10 punts) i la fucsia a *qgauleg* (prenent 50 punts).

Tot i que amb $n=50$ encara oscil·la l'error comès es redueix significativament. Cal tenir en compte que augmentar el nombre de punts fa disparar el temps de càlcul, s'ha de trobar doncs un compromís entre precisió i temps de càlcul.