

ANNEX 5. TIPUS D'ACCIDENTS I
CÀLCUL DE MAGNITUDS.

ÍNDEX

1.	TIPUS D'ACCIDENTS.	3
1.1.	Tipus de fenòmens perillosos.	4
1.2.	Taula Resum.	5
2.	LLINDARS DE LES ZONES D'AFECTACIÓ.	7
2.1.	Llindars per al càlcul de les distàncies ZI i ZA per a fenòmens de tipus tèrmic, mecànic i tòxic.	7
2.2.	Llindars per al càlcul de les distàncies ZI i ZA per a fenòmens de tipus radiològic.	8
2.3.	Llindars per al càlcul de distàncies ZI i ZA per a fenòmens de tipus biològic... ..	9
3.	ESCENARIS ACCIDENTALS I FENOMENS PERILLOSOS.	10
3.1.	Incendis.	11
3.1.1.	Incendi de basal	14
3.1.2.	Dard de foc	16
3.1.3.	Flamarada	18
3.1.4.	Bola de foc	19
3.2.	Explosions.	22
3.2.1.	Deflagració i detonació. Perfils d'ona de pressió.	22
3.2.2.	Explosions no confinades.	25
3.2.3.	Explosions confinades.	26
3.2.4.	Esclat de recipients.	27
3.2.5.	Càlcul de magnituds en les explosions.	29
3.3.	Fuites gasoses.	34
3.3.1.	Classificació dels tòxics.	34
3.3.2.	Concentració i dosi de les substàncies tòxiques.	36
3.3.3.	Llindars de toxicitat.	37
3.3.4.	Interpolació dels índexs de toxicitat.	39
3.3.5.	Dispersió de núvols.	40
4.	VULNERABILITAT. EQUACIONS PROBIT.	52
4.1.	Equacions Probit.	54
4.1.1.	Fuita tòxica.	54
4.1.2.	Radiació tèrmica.	55
4.1.3.	Explosions	56
5.	BIBLIOGRAFIA.	59

1. TIPUS D'ACCIDENTS.

Quan ens referim als tipus d'accidents que es poden originar a causa d'una emergència en el transport de MMPP, la similitud amb els tipus d'accidents que es donen a la indústria química és evident. Cal tenir en compte que el tipus de substàncies involucrades són les mateixes en un i altre cas, així com les seves propietats fisicoquímiques que són, al capdavant, les responsables de la seva perillositat intrínseca.

En el món de la indústria química, la realització d'estudis i avaluacions de seguretat és obligatòria. En aquests estudis s'avaluen els esdeveniments que tenen més probabilitat de generar un accident greu dins d'una indústria, així com els seus efectes i conseqüències per a la població, béns i medi ambient. També es determinen unes distàncies de seguretat dins de les quals es poden patir les conseqüències de l'accident, en major o menor mesura, per tal de determinar zones d'afectació: zona d'alerta i zona d'intervenció.

D'acord amb la Directriu bàsica de planificació de protecció civil davant del risc d'accidents en el transport de MMPP per carretera i ferrocarril, la definició de les zones d'intervenció i alerta és la següent:

- Zona d'intervenció (ZI): és aquella zona on les conseqüències de l'accident han produït o es preveu que puguin produir sobre les persones, béns o medi ambient, danys que requereixin l'aplicació immediata de mesures de protecció.
- Zona d'alerta (ZA): és aquella zona on les conseqüències de l'accident, encara que puguin produir aspectes perceptibles per a la població, no requereixen més mesures d'intervenció que la d'informació a la mateixa, excepte per a certs grups de persones l'estat de les quals pugui fer-les vulnerables (grups crítics) i que puguin requerir mesures de protecció específiques.

Per tal de determinar aquestes zones, s'utilitzen uns llindars relatius a determinades magnituds que marquen la severitat del fenomen perillós que s'ha originat a causa de l'accident i que donarà lloc a determinades conseqüències. És a dir, si per exemple es dona un accident que implica un explosió, els efectes o fenòmens perillosos són radiació tèrmica, emissió de projectils i ona de pressió. Per a cadascun d'aquests efectes les magnituds que marquen la seva severitat són diferents. Així, la intensitat de radiació ens permet valorar la severitat de l'efecte de radiació tèrmica, els valors de la sobrepressió i impuls assolits en un punt determinat permeten avaluar la severitat de l'efecte de l'ona de pressió i l'abast màxim i impuls dels fragments permeten avaluar la severitat de l'efecte de l'emissió de projectils.

La directriu bàsica de transport de MMPP diu que els llindars que s'adopten per a les magnituds dels fenòmens perillosos, per tal d'establir les zones d'intervenció i d'alerta, hauran de ser concordants amb l'estat del coneixement científic sobre els danys originats pels accidents i la seva relació amb les variables físiques representatives dels mateixos.

En el cas dels fenòmens de tipus mecànic, tèrmic i químic s'adopten els mateixos límits que marca la normativa d'accidents greus. En canvi, en el cas dels fenòmens radiològic i biològic cal recórrer a d'altres normatives.

En el punt següent es poden consultar les taules amb els límits corresponents als diferents fenòmens perillosos que s'exposen a continuació.

1.1. Tipus de fenòmens perillosos.

Existeixen diferents classificacions de la tipologia de fenòmens perillosos, una d'elles és la que es mostra a continuació.

De tipus mecànic: Ones de pressió i projectils.

De tipus tèrmic: Radiació tèrmica i acció de la flama directa.

De tipus químic: Núvol tòxic i/o contaminació del medi ambient provocada per la fugida incontrolada de substàncies perilloses.

De tipus radiològic: Contaminació o emissió de radiació per matèries de la classe 7

De tipus biològic: Capacitat de causar malalties infeccioses a animals i/o éssers humans d'alguns agents patògens definits com microorganismes (incloses les bacteries, els virus, els ricketts, els paràsits i els fongs) i d'altres agents com ara els prions.

A banda de la taula que ens dona els valors màxims per delimitar les zones d'intervenció i alerta al voltant de l'origen d'un accident greu, també és interessant poder establir una relació entre el tipus d'accident, l'efecte que se'n pot derivar i la substància o MMPP involucrada.

- Escenaris que determinen fenòmens perillosos de tipus mecànic:
 - *Explosió química*: és aquella en què l'energia necessària per a l'expansió del gas procedeix d'una reacció química.
 - UVCE (explosió de núvol de vapor inflamable no confinat)
 - CVE (explosió de núvol de vapor confinat).
 - *Explosió física*: és aquella en què l'energia necessària per a l'expansió del gas procedeix d'un fenomen físic.
 - Esclat d'un recipient a pressió.
 - Explosió de vapor en expansió d'un líquid en ebullició (BLEVE).
- Escenaris que determinen fenòmens perillosos de tipus tèrmic:

Els fenòmens perillosos de tipus tèrmic són provocats per l'oxidació ràpida, no explosiva, de substàncies combustibles, produint una flama que pot ser estacionària:

 - Incendi de basal
 - Dard de foc

O progressiva:

 - Bola de foc
 - Flamarada o núvol inflamable (fuites de vapor o gas inflamable)

- Escenaris que determinen fenòmens perillosos de tipus químic:
 - Contaminació del medi ambient atmosfèric per formació de núvol tòxic degut a una fuga de producte tòxic directament en fase gas, o bé en fase líquida en condicions de vaporització.
 - Contaminació del medi ambient a través dels vectors sòl i aigua per fuga o vessament incontrolat de substàncies perilloses.

- Escenaris que determinen fenòmens perillosos de tipus radiològic:
 - Irradiació per part del material contingut en un embalum que ha malmès el seu blindatge. No es produeix dispersió del contingut.
 - Contaminació i irradiació per part del material contingut en un embalum que ha resultat malmès. Sí es produeix dispersió del contingut

- Escenaris que determinen fenòmens perillosos de tipus biològic:
 - Contaminació a causa del trencament de l'embalum amb vessament del contingut.

1.2. Taula Resum.

FENOMEN PERILLÓS		TIPUS DE SUBSTÀNCIA	ESCENARI
Mecànic	Sobrepessió	Productes explosius Substàncies inflamables Gasos comprimits Gasos líquats	Explosions físiques. Explosions químiques.
	Projectils		
Tèrmic	Radiació tèrmica	Líquids i gasos inflamables. Gasos líquats inflamables. Sòlids inflamables	Incendi de basal. Dard de foc. Bola de foc. Flamarada o núvol inflamable.
	Flamarada		
Químic	Tòxic	Substàncies tòxiques i perilloses per a la vida.	Fuita tòxica. Incendi amb formació de fums tòxics.
	Contaminació medi ambient	Substàncies perilloses per al medi ambient.	Vessament incontrolat de substàncies perilloses per al MA.
Radiològic	Irradiació	Substàncies radioactives (classe 7)	Trencament del blindatge de l'embalum, sense dispersió del contingut
	Contaminació + irradiació		Trencament de l'embalum i dispersió del contingut.
Biològic	Contaminació	Substàncies infeccioses (classe 6.2)	Trencament de l'embalum i vessament de substàncies infeccioses

Finalment, caldria relacionar els diferents tipus d'accidents amb el tipus d'escenari que es pot generar.

ACCIDENT	ESCENARI
AMB FUITA	Núvol sense danys
	Incendi
	Explosió (confinada o no confinada)
	Flamarada
	Núvol tòxic
	Trencament de l'embalum (dispersió material radioactiu) (MMPP classe 7)
	Trencament de l'embalum (dispersió material infeccios) (MMPP classe 6.2)
SENSE FUITA	BLEVE amb o sense bola de foc.
	Trencament blindatge (irradiació) (MMPP classe 7)

Cal puntualitzar que, sempre que es produeix un accident, és necessari conèixer el tipus de MMPP fuitada per poder preveure l'escenari que s'originarà. És a dir, cal saber si la substància es troba en estat sòlid, líquid o gasos, també cal saber si la substància és volàtil o no i, evidentment, conèixer si té caràcter inflamable, tòxic, radioactiu, etc.

En cas d'accidents sense fuita, només hi ha perill d'irradiació si la substància involucrada en l'accident és radioactiva (classe 7) i l'embalatge s'ha vist malmès, de manera que ha perdut parcial o totalment la seva capacitat de limitar la intensitat de radiació a l'exterior (blindatge).

Per contra, en cas d'accidents amb fuita amb MMPP de la classe 7, hi haurà perill de contaminació radioactiva si l'embalatge ha vist malmesa la seva capacitat de contenció i el seu blindatge. A més, en aquests casos, cal tenir en compte si el material radioactiu transportat es troba en forma dispersable o no.

En el cas d'una BLEVE, inicialment l'accident no comporta fuita, o si més no, no s'origina una fuita a causa de l'accident. Però si és cert que, quan la pressió dins del continent augmenta per sobre d'un determinat valor, les vàlvules de seguretat es disparen i part del contingut surt a l'exterior. Aquesta emissió per les vàlvules de seguretat no és considera com una fuita a conseqüència de l'accident, sinó que les vàlvules es disparen com a mesura de seguretat.

2. LLINDARS DE LES ZONES D'AFECTACIÓ.

2.1. *Llindars per al càlcul de les distàncies ZI i ZA per a fenòmens de tipus tèrmic, mecànic i tòxic.*

Actualment, per al TRANSCAT, es prenen els mateixos llindars que marca la directriu bàsica de protecció civil per al control i planificació davant del risc d'accidents greus en els quals intervenen substàncies perilloses (RD 1196/2003, de 19 de setembre).

Accident / paràmetre perill	Zona d'Intervenció	Zona d'Alerta
Explosió: sobrepressió	125 mbar	50 mbar
Explosió: impuls	150 mbar.s	100 mbar.s
Explosió: projectils	Abast màxim 95% i impuls > 10 mbar.s	Abast màxim 99,9% i impuls > 10 mbar.s
Incendi: radiació tèrmica	$250 \text{ (KW/m}^2\text{)}^{4/3} \cdot \text{s}$ (si > 1,7 KW/m ²)	$115 \text{ (KW/m}^2\text{)}^{4/3} \cdot \text{s}$ (si > 1,7 KW/m ²)
Fuita tòxica	AEGL-2 ERPG-2 TEEL-2 (ordre de prevalença)	AEGL-1 ERPG-1 TEEL-1 (ordre de prevalença)
Flamarada (no recollit a la legislació)	½ de LII	-

2.2. **Lindars per al càlcul de les distàncies ZI i ZA per a fenòmens de tipus radiològic.**

La IAEA¹ recomana radis per a la zona d'intervenció, en funció del tipus d'embalum involucrat.

SITUACIÓ	RADI DE LA ZONA D'INTERVENCIÓ
Embalum intacte amb una etiqueta I-BLANCA, II-GROGA o III-GROGA	Zona que envolta immediatament l'embalum
Embalum danyat amb una etiqueta I-BLANCA, II-GROGA o III-GROGA	Radi de 30 m o: <ul style="list-style-type: none"> • Nivells de taxa de dosis ambiental de 100 µSv/h • Nivells de contaminació superficial gamma/beta de 1000Bq/cm² • Nivells de contaminació superficial alfa de 100Bq/cm²
Font comuna no danyada (producte de consum) com detectors de fum	No s'aplica
Altres fonts sense blindatge o desconegudes (danyades o intactes)	Radi de 30 m o: <ul style="list-style-type: none"> • Nivells de taxa de dosis ambiental de 100 µSv/h • Nivells de contaminació superficial gamma/beta de 1000Bq/cm² • Nivells de contaminació superficial alfa de 100Bq/cm²
Vessament	Zona del vessament més 30 m al seu voltant
Vessament de gran magnitud	Zona del vessament més 300 m al seu votant
Incendi, explosió o fum, combustible gastat, sospita de dispositiu de dispersió radiològica (bomba bruta)	Radi de 300 m (o més com a mesura de protecció contra els efectes d'una explosió) o: <ul style="list-style-type: none"> • Nivells de taxa de dosis ambiental de 100 µSv/h • Nivells de contaminació superficial gamma/beta de 1000Bq/cm² • Nivells de contaminació superficial alfa de 100Bq/cm²

La zona d'alerta establerta al voltant de la zona d'intervenció serà la zona de seguretat requerida pels diversos actuants per gestionar correctament l'emergència.

¹ EPR-METHOD (2003) Método para elaborar disposiciones de respuesta a emergencias nucleares o radiológicas. Actualización del documento IAEA-TECDOC-953/S publicada en 2009.

Aquests criteris serveixen per establir en els primers moments de l'emergència, les zones de planificació. Posteriorment, la valoració de l'emergència que facin els experts radiològics (grup radiològic) permetrà ajustar millor aquesta zonificació en cada cas específic.

2.3. *Lindars per al càlcul de distàncies ZI i ZA per a fenòmens de tipus biològic.*

En el cas de les substàncies infeccioses, la normativa no marca uns lindars concrets per al càlcul de ZI i ZA. Sí que es pot trobar a les diferents reglamentacions requisits d'embalatge i condicions de transport, entre d'altres.

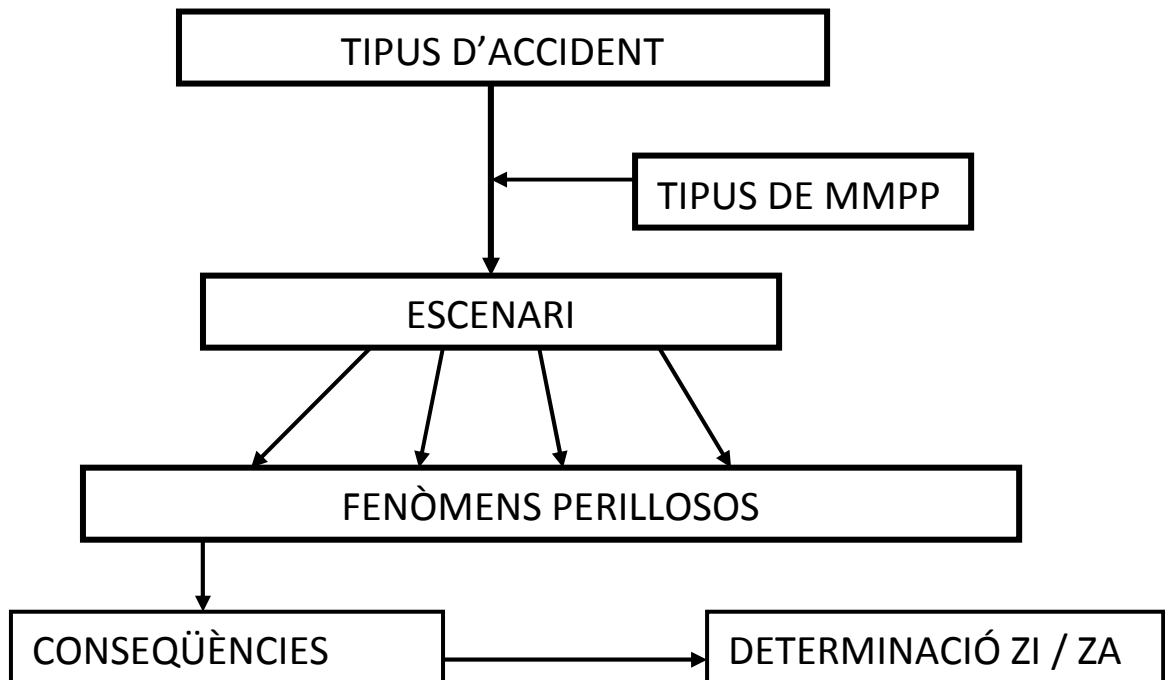
En cas d'accident, a la Guia sobre la Reglamentació relativa al Transport de Substàncies Infeccioses 2011–2012, de l'Organització Mundial de la Salut (WHO/HSE/IHR/2010.8), es poden trobar els passos per dur a terme el procediment de neteja en cas de vessament.

En tot cas, caldrà senyalitzar la zona de l'accident i reduir al màxim el nombre de persones dins de l'àrea de risc.

Procediment de neteja per a qualsevol tipus de matèria infecciosa:

- 1)** Utilitzar guants, roba de protecció i protecció facial i ocular, si està indicat.
- 2)** Recobrir el vessament amb un drap de roba o paper absorbent perquè no s'estengui.
- 3)** Ruixar amb una solució desinfectant adequada sobre el drap o paper i a la zona circumdant (les solucions de lleixiu al 5 % solen ser adequades)
- 4)** Aplicar el desinfectant començant pel marge exterior de la zona afectada pel vessament i avançar de forma concèntrica cap al mig.
- 5)** Transcorreguts uns 30 minuts, retirar els materials. Si hi ha vidres trencats o altres objectes punxants, recollir-los amb un recollidor o un tros de cartró rígid i dipositar-los en un envàs resistent a les perforacions per a la seva eliminació.
- 6)** Netejar i desinfectar la zona afectada pel vessament (en cas necessari, repetir els passos 2 a 5).
- 7)** Desfer-se dels materials contaminats dipositant-los en un envàs per a l'eliminació de residus estanc i resistent a la perforació.
- 8)** Un cop duta a terme la desinfecció efectiva, notificar l'incident a l'autoritat competent i informar del lloc que ha estat contaminat.

3. ESCENARIS ACCIDENTALS I FENOMENS PERILLOSOS.



A la figura anterior es mostra de forma esquemàtica les informacions que cal avaluar per arribar a decidir quines són les distàncies d'afectació en cas d'accident.

Davant d'un accident amb un MMPP, cal conèixer inicialment si hi ha o no hi ha fuga i quina és la MMPP que s'hi ha vist involucrada. Amb aquesta informació es pot concretar o preveure quin és l'escenari o escenaris que podem tenir (incendi, explosió, fuga tòxica, etc.) i els fenòmens perillosos que hi estan associats (de tipus mecànic, tèrmic, químic, biològic o radiològic). D'aquesta manera, podrem saber a quines conseqüències cal fer front i, d'acord amb els estudis de perill i els límits que marquen les normatives, decidir quines són les distàncies de la zona d'alerta i la zona d'intervenció.

A continuació es descriuran els principals tipus d'escenaris que es podrien donar en cas d'accidents amb un transport de MMPP i les variables que determinen la seva severitat. Es tractaran els escenaris relacionats amb fenòmens perillosos de tipus mecànic, tèrmic i químic. Pel cas de fenòmens biològic i radiològic, es poden consultar els annexos específics per a aquestes classes de MMPP (annex 2 i annex 3 respectivament)

3.1. Incendis.

Hi ha diferents tipus d'incendi:

- ✓ Incendi de toll o incendi de basal: es dóna quan es produeix un vessament de líquid inflamable al terra i aquest s'evapora lentament. L'àrea del toll és l'àrea màxima del basal format pel líquid fuitat.
- ✓ Dard de foc: es dóna quan fuita una MMPP inflamable en fase gas en règim turbulent, normalment es tracta d'una fuita a pressió per un forat, una vàlvula o una canonada seccionada. Consisteix en una flama estacionària de gran longitud i poca amplada, el seu abast és limitat però important en la direcció en què es dóna, ja que la flama és direccional i constant.
- ✓ Flamarada: es dóna quan s'incendia un núvol de vapor inflamable procedent directament del producte fuitat en fase gas, o bé procedent dels vapors despresos d'un vessament en fase líquida d'una MMPP inflamable. L'incendi sol ser diferit, aleshores la flama es desplaça des del punt d'ignició fins la font a través de les zones del núvol que es troben dins dels límits d'inflamabilitat. Depenent de les condicions, la flamarada pot originar una deflagració o fins i tot una detonació, encara que aquesta última situació és molt improbable.
- ✓ Bola de foc: es dóna en casos de fuita instantània i ignició quasi bé immediata. Aquest tipus d'incendi va associat a accidents en què té lloc una BLEVE, que és un tipus concret d'explosió. No obstant això, no sempre que es doni una BLEVE es generarà una bola de foc, només serà així en el cas que la MMPP que hi està involucrada sigui inflamable. Es tracta d'un incendi quasi immediat, de forma més o menys esfèrica, de tota la massa combustible.

En cas d'incendi, les conseqüències més immediates per a les persones exposades són l'acció de la flama directa i la radiació tèrmica.

Radiació tèrmica

Seguidament veurem com s'avalua l'efecte de la radiació tèrmica, cal dir que per avaluar aquest efecte cal tenir en compte tant l'emissor de la radiació com el receptor exposat a aquesta radiació. Ja que en cas que el receptor estigui a una certa distància de l'incendi, el mecanisme de transferència de calor és la radiació, mentre que si el receptor es troba immers en l'incendi, els mecanismes de transferència de calor que intervenen són la convecció i la radiació.

L'expressió per calcular la radiació tèrmica sobre un objecte a una distància determinada de les flames és:

$$Q = \tau * F * E$$

on,

Q: Intensitat de radiació a una distància determinada (kW/m²)

τ : coeficient de transmissió atmosfèrica (adimensional)

F: factor geomètric de visió o factor de vista o factor de forma (adimensional)

E: intensitat mitja de radiació de la flama (kW/m²)

Analitzem un per un cadascun dels factors:

a) Coeficient de transmissió atmosfèrica.

La radiació que emeten les flames, fins a l'objecte receptor, es veu atenuada pels efectes de l'absorció i reflexió del medi. L'absorció de la radiació és deguda principalment al diòxid de carboni i al vapor d'aigua. Per tant, depenent de la seva concentració en el medi, el coeficient tindrà un valor diferent.

$$\tau = 1 - \alpha_w - \alpha_c$$

α_w : coeficient d'absorció del vapor d'aigua.

α_c : coeficient d'absorció del diòxid de carboni.

El coeficient de transmissió atmosfèrica mostra una dependència majoritària del coeficient d'absorció del vapor d'aigua, ja que la concentració de CO₂ és manté força estable, mentre que la del vapor d'aigua és més variable.

A la bibliografia, es poden trobar gràfics que donen el valor del coeficient de transmissió en funció de la distància per a diferents temperatures ambientals i graus d'humitat relativa.

No obstant això, també existeix una fórmula empírica utilitzada sovint per calcular el coeficient de transmissió atmosfèrica, que és la següent:

$$\tau = 2,02(P_w * x)^{-0.09}$$

on

P_w és la pressió parcial del vapor d'aigua a una temperatura determinada

x és la distància des de la superfície de la flama a l'objecte receptor.

b) Factor geomètric.

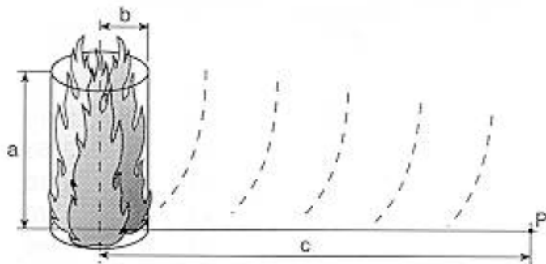
El factor de vista valora l'efecte de la forma geomètrica de les flames (alçada i superfície de la base del líquid incendiada), la distància a un punt P o superfície irradiada i la posició o orientació d'aquesta superfície irradiada (vertical, horitzontal o inclinada).

F_v : factor per a superfícies verticals

F_h : factor per a superfícies horitzontals

$F_{max.}$: factor per a superfície inclinada d'irradiació màxima

Pel que fa a la geometria de la flama, en un incendi de basal, el més habitual és aproximar la geometria de les flames a un cilindre.



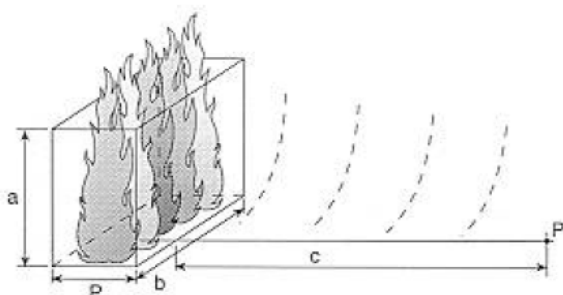
Forma cilíndrica :

a = alçada de la flama

b = radi circular

c = distància entre el centre de la base de les flames i el punt irradiat

En cas que la l'incendi es doni en un espai que confini la base de les flames amb forma rectangular, cal conèixer els valors d'a, b i P per determinar els factors geomètrics.



Forma rectangular:

a = alçada de la flama

b = llargada del rectangle de la base de les flames

P = amplada del rectangle de la base de les flames

c = distància entre el centre de la base de les flames i el punt irradiat

El càlcul del factor de vista per a diferents configuracions es pot trobar a la majoria de la bibliografia especialitzada de transmissió de calor amb les fórmules corresponents. Es poden consultar les taules que donen els diferents valors de F_h , F_v i F_{max} . en funció dels valors obtinguts a les relacions: a/b , c/b , b/c i a/c i d'acord amb la geometria de l'incendi: circular o rectangular.

En general, el factor de vista màxim es pot calcular amb l'expressió:

$$F_{max.} = (F_h^2 + F_v^2)^{1/2}$$

c) Intensitat de radiació de la flama

Aquesta magnitud fa referència a la quantitat de calor emesa en forma de radiació per unitat de superfície de la flama.

El càlcul d'aquesta magnitud és difícil, ja que la radiació tèrmica en un incendi prové tant dels gasos emesos com de les partícules de cendra i, per tant, cal tenir en compte l'emissivitat combinada de tots els productes de combustió.

- $E = E_b \epsilon$

(ϵ : emissivitat combinada dels productes de combustió (adimensional))

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

T_f i T_a són les temperatures de la flama i ambient (K)

σ és la constant de Stefan Boltzmann = $56.7 \cdot 10^{-12} \text{ kW m}^{-2} \text{ K}^{-1}$

En incendis grans, l'emissivitat tendeix a 1, això permet calcular la intensitat de radiació de la flama únicament a partir de la temperatura mitja de les flames. No obstant això, molts cops el problema és conèixer aquesta temperatura mitja. Se solen utilitzar valors experimentals.

A més, cal tenir en compte que en grans incendis d'hidrocarburs, part de la flama queda amagada per una capa espessa de fum i, atès que el fum absorbeix part de la radiació emesa, la intensitat de radiació disminueix.

En aquests casos es pot utilitzar la fórmula:

$$E_{\text{mitja}} = E_m * e^{-0.12D} + E_s (1 - e^{-0.12D})$$

On, D és el diàmetre del bassal, E_m és la intensitat de radiació de les flames i E_s és la intensitat de radiació del fum.

A la bibliografia es poden trobar taules amb valors d'intensitat de radiació segons la substància inflamable que genera l'incendi.

Un cop ja es coneix la fórmula general per calcular la intensitat de radiació a una distància determinada (Q) d'un incendi i el significat de cadascun dels seus factors, el que cal fer és estudiar de forma particular els diferents tipus d'incendis i veure quins paràmetres és necessari calcular per conèixer els diferents factors (E , F i τ).

3.1.1. Incendi de bassal

En un incendi de bassal a l'aire lliure, s'aplica el model de flama sòlida, el qual suposa que la flama és un sòlid d'una forma cilíndrica ben definida que es comporta com un emissor gris.

Geometria de la flama.

Se suposa una geometria cilíndrica, així doncs, caldrà determinar el diàmetre i l'alçada. En cas que hi hagi vent, també caldria determinar la inclinació.

Càlcul del diàmetre:

En cas que l'incendi tingui lloc en un recipient o el vessament quedi confinat en una superfície circular, el diàmetre serà directament el del recipient o superfície de contenció. Si la cubeta és rectangular, es calcula el radi equivalent (b_{eq}), de manera que s'equipara l'àrea del rectangle a un cercle de radi b_{eq} .

Superfície rectangle=superfície circular

$$bP = \pi (b_{eq})^2$$

$$b_{eq} = (bP/\pi)^{1/2}$$

on b i P són respectivament la llargada i l'amplada del rectangle.

En els casos en què no hi ha una barrera de contenció per al vessament, a la bibliografia es poden trobar les fórmules per calcular el diàmetre màxim del bassal distingint si es tracta d'un vessament instantani o continu.

Càlcul de l'alçada:

Per al càlcul de l'alçada de la flama es pot utilitzar la fórmula empírica:

$$a = 29 * b^{0.7} * m^{0.6}$$

on:

a és l'alçada (m)

b és el radi del recipient o, en el seu cas, radi equivalent (m)

m és la taxa de combustió o cabal de producte evaporat ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

Una altra expressió molt coneguda per al càlcul de l'alçada és la de Thomas (1963), que s'utilitza sovint:

$$\frac{a}{D} = 42 \left[\frac{m}{\rho_a \sqrt{gD}} \right]^{0.61}$$

On:

a és l'alçada (m)

D és el diàmetre equivalent (m)

m és la taxa de combustió o cabal de producte evaporat ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

ρ_a és la densitat de l'aire (1.2 kg/m^3)

g és l'acceleració (9.8 m/s^2)

Càlcul de la taxa de combustió o cabal de producte evaporat.

S'utilitza la fórmula següent:

$$m = K \frac{h_c}{h_v} 10^{-3} \text{ kg/m}^2 \text{ s}$$

On,

h_c = calor de combustió del producte evaporat (J/kg)

h_v = calor latent de vaporització (J/kg)

K = constant adimensional en funció de la temperatura d'ebullició.

Cal distingir dues situacions diferents a l'hora d'aplicar la fórmula.

a) Líquids amb punt d'ebullició inferior a la temperatura ambient ($T_{eb} < T_{amb}$), en aquest cas $K=1$

b) líquids amb punt d'ebullició superior a la temperatura ambient ($T_{eb} > T_{amb}$), en aquest cas el valor de K ve donat per l'expressió:

$$K = \frac{h_v}{C_p \Delta T + h_v}$$

On, C_p és la calor específica a pressió constant (j/Kg·K) i ΔT és la diferència entre la temperatura d'ebullició i la temperatura ambient (K)

Coneixent el valor de la taxa de combustió (m) i el valor del radi (b) o, en el seu cas, radi equivalent (b_{eq}), es podrà calcular l'alçada de les flames.

Efectes tèrmics.

El càlcul del diàmetre i l'alçada de les flames són els paràmetres que ens serviran per calcular els factors geomètrics o de vista a través de les taules de la bibliografia, els quals ens permetran aplicar la fórmula que ens donarà la radiació tèrmica sobre un objecte a una determinada distància.

$$Q = \tau * F * E$$

El valor del coeficient de transmissió atmosfèrica (τ) es calcula tal com s'ha explicat a l'apartat a) del punt 3.1.

Pel que fa a la intensitat de radiació de la flama (E) es poden trobar valors a la bibliografia segons quin sigui el producte involucrat a l'incendi, tal com s'explica a l'apartat c) del punt 3.1.

Ara bé, també és possible calcular E mitjançant expressions matemàtiques, encara que això és difícil perquè cal conèixer l'emissivitat de tots els productes de combustió, la qual depèn de les concentracions i de la temperatura de la flama, que tampoc no és fàcil de determinar.

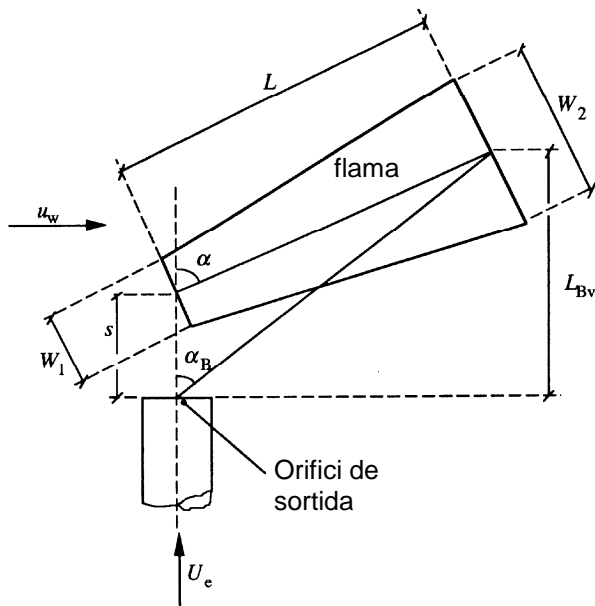
3.1.2. Dard de foc

En cas d'una fuga de gas o vapor inflamable a pressió es genera un dard de foc. En aquest cas no entrarem a descriure les fórmules concretes per al càlcul dels paràmetres de la geometria de l'incendi, sinó que es farà únicament una descripció del model utilitzat.

Geometria de la flama.

Segons el model desenvolupat per Kalghatgi, la flama del dard es pot assimilar a un con i es poden conèixer els paràmetres de l'alçada, amplada de la base inferior, amplada de l'extrem superior i llargada de la flama.

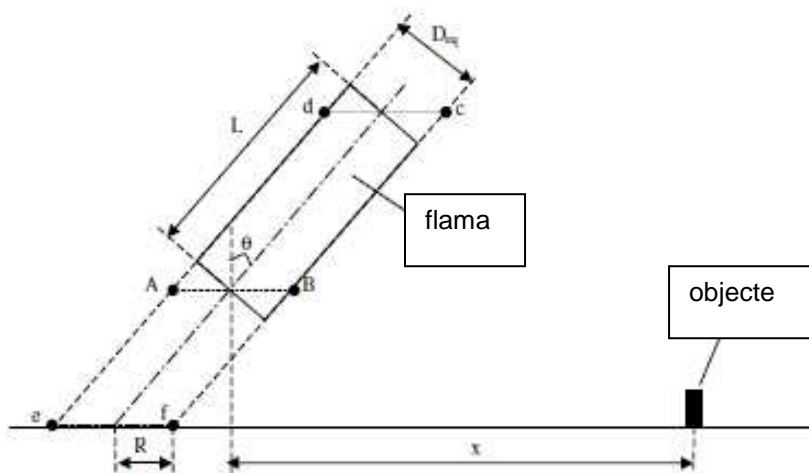
Cal tenir en compte que, en un dard de foc hi ha una certa distància entre el forat de sortida del gas o vapor inflamable i el punt on s'inicia la flama, això és degut a que cal que la velocitat de sortida del gas disminueixi de forma suficient fins que la combustió sigui estable. Per aquest motiu, és diferent el diàmetre del punt de sortida (orifici) que el diàmetre de l'extrem inferior del con format per la flama.



Esquema de la geometria de la flama d'un dard de gas segons el mètode de Kalghatgi
 Font: Anàlisi del riesgo en instalaciones industriales. Casal et al. (1999)

Efectes tèrmics.

Per calcular el efectes tèrmics en el cas del dard de foc també s'utilitza el model de flama sòlida, en el qual, tal com s'ha explicat anteriorment, assimila la flama a un cilindre. Per tant, el que cal fer, per aplicar els resultats del model de Kalghatgi de la geometria de flama al model de flama sòlida, és transformar el con en un cilindre equivalent que tingui la mateixa superfície i calcular els seus paràmetres de diàmetre i alçada.



Esquema d'un dard de gas, segons una geometria cilíndrica
 Font: Anàlisi del riesgo en instalaciones industriales. Casal et al. (1999)

Així mateix, també variaran el factor de vista (F) i la intensitat mitja de radiació de la flama (E). A la bibliografia es poden trobar les fórmules que permeten recalculer aquests factors.

Finalment s'utilitzarà la fórmula general per calcular la intensitat de radiació a una distància determinada:

$$Q = \tau * F * E$$

3.1.3. Flamarada

Aquest tipus d'incendi de flamarada, o també anomenat flash fire, es dona quan tenim una fuga d'un gas o vapor inflamable que forma un núvol, el qual es va dispersant fins que troba un punt d'ignició.

Hi ha altres casos en què el núvol es forma a partir d'un vessament d'un líquid que es troba en condicions d'evaporació ràpida.

Un cop el núvol troba el punt d'ignició, la flama es desplaça a través de les parts del núvol que es troben dins dels límits d'inflamabilitat. Depenent dels obstacles o grau de confinament que hi pugui haver en aquest camí, és possible que d'un incendi es pugui passar a una explosió. Un augment del grau de confinament o la presència d'obstacles a prop del punt d'ignició provocaran una acceleració del front de flama i podrien donar lloc a una explosió on els efectes de pressió són importants. La diferència amb el cas que només tinguem un incendi, encara que sigui un incendi de propagació ràpida, és que en aquest cas els efectes de pressió són menyspreables i el major perill el determinen els efectes tèrmics.

Si la ignició es produís de forma immediata el fenomen que tindria lloc és el que s'anomena un bola de foc, de la qual es parla en el següent punt.

Geometria de flama.

Un dels models utilitzats per Eisenberg (1975) suposa que l'incendi té una forma de mitja elipsoide. Els paràmetres bàsics que es calculen en aquest cas són el volum i l'àrea que emet radiació.

En el càlcul d'aquests paràmetres intervenen coeficients de dispersió del núvol de gas inflamable. (veure punt 3.3.5.4)

Efectes tèrmics.

Atesa la curta duració d'aquest tipus d'incendi, es considera que totes les persones que es vegin directament involucrades moriran immediatament.

Per calcular els efectes per radiació a elements que es trobin a una certa distància, el model d'Eisenberg (1975) utilitza la fórmula:

$$Q = \tau * F * E = \tau * F * \epsilon * \sigma (T_f^4 - T_a^4)$$

El problema principal és que per conèixer la intensitat de radiació de la flama (E) cal conèixer la temperatura de la flama, la qual varia força en el transcurs de l'incendi.

S'aconsella més utilitzar el Model de Font Puntual per obtenir el valor de la intensitat de radiació a una distància determinada:

$$Q = \frac{1}{4\pi \cdot x} f_R * m * \Delta H_c$$

On,

x = distància entre la flama i l'objecte. (m)

f_R = fracció d'energia emesa en forma de radiació (---)

m = taxa de combustió o cabal de producte evaporat ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

ΔH_c = calor de combustió (kJ/kg)

Cal saber que, aquest model només es pot aplicar per determinar la radiació en un punt molt allunyat de la flama, per a distàncies curtes l'error és molt gran.

3.1.4. Bola de foc

El fenomen de la bola de foc sol anar associat al fenomen de la BLEVE (el qual es descriu en l'apartat d'explosions), però no necessàriament ha de ser així. Els dos fenòmens són independents, només es troben associats en aquells casos en què la substància que ha provocat la BLEVE tingui caràcter inflamable.

La bola de foc es genera per la ignició gairebé immediata de tota la massa combustible en un període de temps molt curt. La radiació tèrmica és molt intensa fins i tot des de l'inici del fenomen, de manera que no permet la fugida de totes aquelles persones que es troben a les immediacions.

Geometria de flama.

Els paràmetres que cal conèixer per avaluar la radiació tèrmica emesa en cas d'una bola de foc són:

- Diàmetre de la bola de foc.
- Alçada de la bola de foc.
- Duració màxima de la deflagració.

Per avaluar aquests paràmetres hi ha expressions que correlacionen el diàmetre i la duració del fenomen amb la quantitat de combustible involucrat.

- Diàmetre (m): $D = a M^b$
- Temps de duració (s): $t = c M^e$

On, M és la quantitat de combustible (kg) i (a, b, c i e) són constants empíriques o semiempíriques.

Els valors de les constants poden variar segons l'autor o referència bibliogràfica que utilitzem.

Les proposades per TNO són:

a = 6.48 b = 0.325
c = 0.852 e = 0.260

per tant, les expressions per al càlcul del diàmetre i temps de duració de la bola de foc queden de la següent manera:

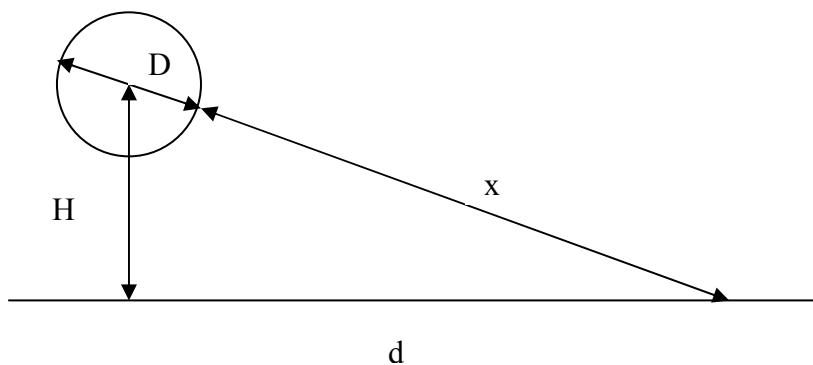
$$D = 6.48 \times M^{0.325}$$

$$t = 0.852 \times M^{0.26}$$

L'alçada de la bola de foc es calcula amb l'expressió:

- Alçada del centre de la bola (m) $H = 0.75 D$

Aquesta alçada és necessària per poder calcular la distància entre la superfície de la flama i l'objecte exposat a la radiació (x)



Efectes tèrmics.

Per avaluar la intensitat de radiació a una distància determinada, es pot utilitzar el model de cos sòlid:

$$Q = \tau * F * E$$

Caldrà conèixer com calcular cadascun dels factors.

El coeficient de transmissió atmosfèrica (veure punt 3.1 apartat a) es calcula amb l'expressió:

$$\tau = 2,02(P_w * x)^{-0.09}$$

on,

P_w és la pressió parcial del vapor d'aigua a una temperatura determinada (Pa)

x és la distància des de la superfície de la flama a l'objecte receptor. (m)

El factor geomètric es calcula per una fórmula senzilla, tenint en compte que la bola s'assimila a una esfera i que el cos receptor s'assimila a una superfície perpendicular a la radiació directa en la línia procedent del centre de l'esfera.

$$F = \frac{D^2}{4r^2}$$

On,

D és el diàmetre de la bola (m)

r és la distància entre l'objecte receptor i el centre de la bola (m). En el dibuix anterior, $r = (\frac{1}{2})D + x$

Finalment, pel que fa a la intensitat de radiació de la flama (E), es pot calcular a partir de l'expressió següent:

$$E = \frac{f_r M H_c}{\pi D^2 t}$$

On,

M és la massa total de combustible (kg)

H_c és la calor de combustió (kJ/kg)

D és el diàmetre de la bola de foc (m)

t és el temps de duració de la bola de foc. (s)

f_r és el coeficient de radiació, que pot oscil·lar entre 0.25 i 0.40. Aquest coeficient ens indica la fracció de l'energia total desenvolupada a la combustió, ja que aquesta es veu reduïda per les pèrdues, principalment a la convecció de fums combustió. (adimensional)

3.2. Explosions.

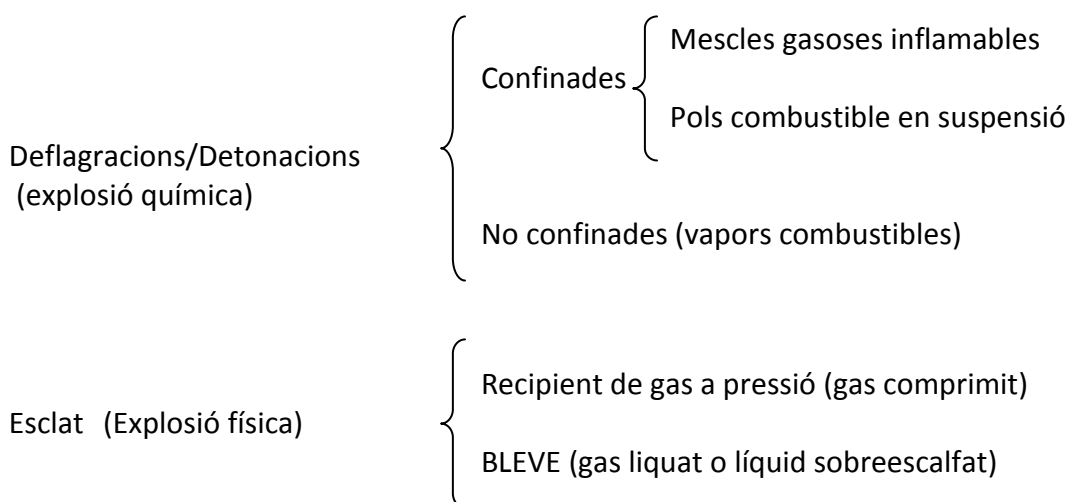
Una explosió és un procés en el qual es produeix una alliberació d'energia extremadament ràpida que genera una ona de pressió a l'aire circumdant. A mida que l'ona es desplaça es va allunyant de la font d'origen alhora que va perdent energia.

Hi ha diferents tipus d'explosions depenent en quina forma es trobés originàriament l'energia alliberada: explosió química, física o nuclear

En aquest apartat es tractaran les explosions d'origen físic i químic, deixant de banda les reaccions fora de control dins de les d'origen químic, perquè són més pròpies d'instal·lacions industrials que no pas del transport de MMPP.

Un altre efecte a tenir en compte, a banda de l'ona de pressió, quan l'explosió es dona en un recipient o espai tancat, és la projecció de fragments a l'exterior, els quals poden assolir distàncies molt allunyades del punt d'origen de l'explosió.

Tipus d'explosions:



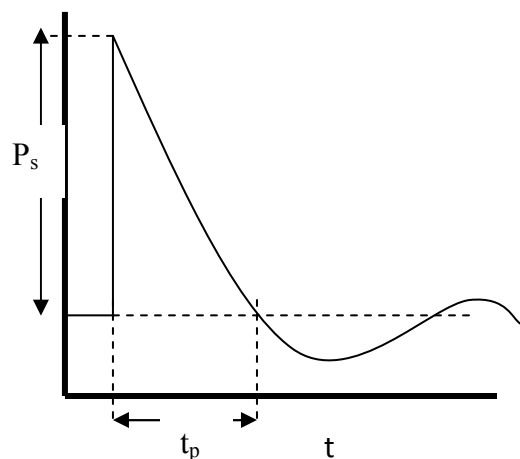
Sigui quin sigui el tipus d'explosió, els efectes són comuns i es poden estudiar conjuntament, ja que en tots els casos es genera una ona de pressió que es propaga per l'aire.

3.2.1. Deflagració i detonació. Perfils d'ona de pressió.

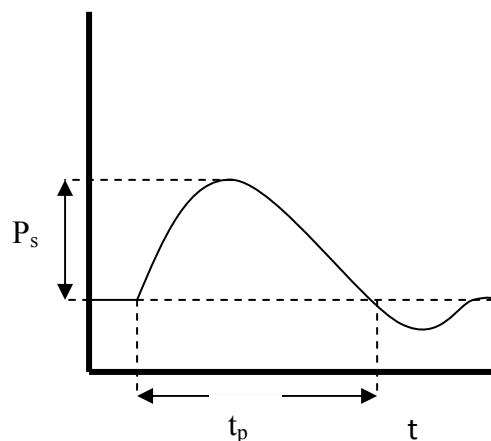
Les explosions poden ser de dos tipus: deflagracions o detonacions. Cadascuna d'elles segueix un perfil de l'ona de pressió diferent.

En el cas de la deflagració, la velocitat de l'ona de pressió en el medi sense reaccionar és subsònica, mentre que en el cas de la detonació la velocitat és supersònica.

A la figura següent es mostren els perfils per a la detonació (A) i per a la deflagració (B), on P_s és la sobrepressió estàtica (pressió assolida per l'ona en un punt determinat) i t_p és la duració de la fase positiva.



Perfil A



Perfil B

En els dos perfils es pot veure que l'ona té una fase positiva on hi ha un augment de la pressió en el temps, seguit d'un descens de la pressió fins a valors inferiors a la pressió atmosfèrica. La sobrepressió pot ser positiva, durant el que s'anomena la fase positiva, o pot ser negativa, durant la fase negativa.

Els paràmetres característics del perfil de l'ona són: la **sobrepressió màxima** assolida (P_s), el **temps de duració de cada fase** (t_p) i l'**impuls** (i)

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

Atès que les gràfiques poden assimilar-se a una forma triangular, es pot calcular l'impuls com l'àrea continguda dins del triangle d'alçada P_s i base t_p

El gràfic del perfil A correspon a una explosió ideal (TNT), on una petita quantitat de matèria allibera gran quantitat d'energia en un temps curt, que és el cas típic de les substàncies de tipus explosiu.

Els núvols de vapors inflamables tenen un comportament diferent. No solen detonar, sinó que com a molt provoquen deflagracions ràpides, situació que correspon al gràfic del perfil B. Que la deflagració sigui més ràpida marcarà que el valor de P_s sigui major i el valor de t_p sigui menor que en el cas d'una deflagració lenta.

Cal dir que la fase negativa i la sobrepressió negativa no se solen tenir en compte per al càlcul de conseqüències en el cas d'explosions per detonació, però en el cas de deflagracions de núvols inflamables, podria donar-se el cas que, si el valor de la sobrepressió negativa és elevat, es produeixin danys per succió a les estructures.

La principal diferència entre el mecanisme de reacció d'una deflagració i d'una detonació consisteix en què a la detonació la sobrepressió i temperatures generades per l'ona són capaces de produir la descomposició dels reactius en un temps molt i molt petit, mentre que per a la deflagració el fenomen és més lent, ja que els reactius s'activen per la calor alliberada per la reacció, que triga més a arribar degut a la menor velocitat dels mecanismes de transport.

Substàncies explosives

En el cas de substàncies explosives, el més habitual és tenir detonacions, sobretot si es troben confinades perquè l'ona inicial es reflexa a les parets del contenidor i retorna impactant sobre el front de reacció, cosa que fa que augmenti la pressió i temperatura i així es puguin assolir de forma ràpida les condicions necessàries per l'autoignició dels reactius no combustionats, iniciant-se una detonació.

Ara bé, cal dir que un explosiu pot detonar o no depenent de condicions externes, com per exemple: la intensitat de la font d'ignició, el grau de confinament i la geometria del contenidor.

Existeixen explosius detonants que poden cremar sense detonar sota determinades condicions que facin que no es generi l'ona de pressió iniciadora. Per exemple, el TNT pot cremar sense explotar, mentre que el nitrat amònic (amb menor poder explosiu) pot detonar si es troba confinat.

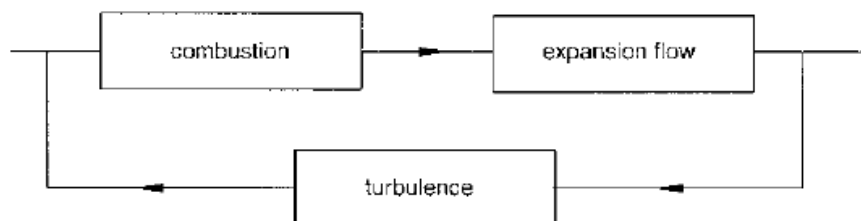
Explosió de Núvol de vapor

Perquè un núvol de vapor inflamable iniciï la combustió cal que la mescla combustible - aire es trobi dins dels límits d'inflamabilitat i, a més, que aquesta mescla trobi una font d'ignició. Aleshores el front de flama es propaga en règim laminar, inflamant els reactius i deixant rere seu els productes de combustió calents.

La velocitat de propagació del front de flama en el cas d'incendi o explosions de núvols de gas o de vapor és molt menor al cas de la detonació. El mecanisme de propagació de flama es regeix per la difusió molecular de la calor, que té un velocitat de combustió laminar molt menor. Aquesta diferència de velocitats entre el front de flama i l'ona de sobrepressió fa que avancin per separat i la transferència d'energia entre elles no sigui eficient. Contràriament al que passa en el cas de la detonació.

La velocitat de propagació de flama es veu incrementada quan existeixen factors que trenquen el règim laminar i fan que augmenti la superfície específica del front de flama. Aquesta distorsió de la capa laminar s'afavoreix amb la presència d'obstacles que provoquen la formació de gradients de velocitat i fan augmentar el grau de turbulència. Per tant, un major grau de confinament i/o major presència d'obstacles provoca un augment de la velocitat de propagació de flama i això pot fer que d'una deflagració passem a tenir una detonació.

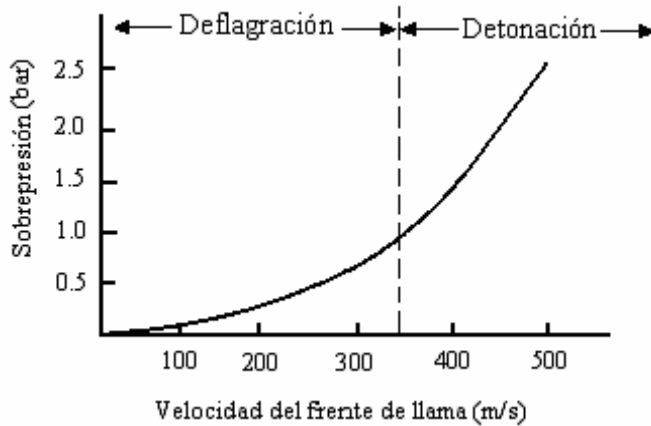
La turbulència provoca un fenomen cíclic de retroalimentació, ja que la turbulència accelera els fenòmens de transport però també la superfície efectiva del front de flama. Això fa que la formació de productes de combustió sigui més ràpida i es generin més gasos evacuats que augmenten l'empenta i, per tant, la velocitat absoluta del front de flama.



Mecanisme de retroalimentació de la deflagració. (TNO 1997)

Atès que la sobrepressió depèn de la velocitat del front de flama, si la deflagració experimenta el fenomen de la retroalimentació la sobrepressió augmentarà i els efectes seran més destructius.

La gràfica següent mostra la relació entre la sobrepressió (bar) i la velocitat del front de flama (m/s).



Relació de la velocitat del front de flama i la sobrepressió (Lees, 1966)

A més, cal tenir en compte que perquè la combustió d'un núvol comenci com una deflagració o com una detonació directa depèn de l'energia de la font d'ignició. Per iniciar una deflagració es suficient una energia de l'ordre de 10^{-4} J, mentre que per a una detonació es necessiten nivells de 10^9 J. Aquesta és la raó principal per la qual la detonació directa d'un núvol de vapor és altament improbable, si de cas, la detonació vindrà a través d'una transició deflagració – detonació.

En relació a la quantitat inicial de massa combustible, cal dir que, alguns autors que han estudiat incendis amb flamarada, afirmen que, a banda del grau de confinament, perquè un incendi d'un núvol de vapor no confinat evolucioni a explosió cal una massa mínima de substància inflamable. Aquesta quantitat mínima pot anar d'1 a 15 tones, depenent de la substància, tot i que s'han descrit casos en què productes molt reactius com hidrogen o acetilè han provocat explosions amb molta menys quantitat, 100 kg o menys.

3.2.2. Explosions no confinades.

Els núvols de vapor no confinats se solen generar arran d'una fuga d'un gas o vapor inflamable o bé d'un vessament líquid a partir del qual es formin vapors inflamables. La mescla d'aquest combustible amb l'aire forma un núvol que pot evolucionar de diferents maneres:

- Dispersió sense ignició ni danys.
- Ignició immediata, que donarà lloc a la formació d'un incendi de basal
- Ignició diferida, que doni lloc a una flamarada (deflagració)
- Ignició diferida, que doni lloc a una explosió (detonació)

La diferència entre els dos darrers casos es troba principalment en la velocitat de propagació de la flama, com major sigui aquesta velocitat major serà la sobrepressió a la qual es pot arribar.

Les explosions de vapor no confinades són un dels majors perills dins la indústria química. En el cas del transport de MMPP, les conseqüències d'un accident on es produeixi la formació d'un núvol inflamable que pateixi una ignició diferida dependrà molt de l'entorn, ja que depenent de si es tracta d'una superfície oberta o un espai amb moltes edificacions la severitat de l'accident pot variar molt. En cas que només es produeixi la deflagració del núvol inflamable, el dany més important vindrà donat per la radiació tèrmica, mentre que si la deflagració es converteix en detonació el dany augmentarà per la formació de l'ona de pressió i possible destrucció d'edificacions.

3.2.3. Explosions confinades.

- Mescles gasoses inflamables.

Aquest tipus d'explosions es poden donar arrel de fuites de gas o vapor inflamable dins d'un espai confinat. Cal que la relació de concentracions combustible – aire (oxigen) es trobi dins dels límits d'inflamabilitat i el núvol trobi un punt d'ignició.

El rang d'inflamabilitat ve donat per un valor límit inferior i un valor límit superior, fora d'aquest rang de concentracions la mescla no inflama. Si la relació de concentracions es troba per sota del valor límit inferior d'inflamabilitat (LII), no es produirà la combustió degut a que la mescla és massa pobre en quantitat de combustible, mentre que si la relació de concentracions es troba per sobre del valor límit superior d'inflamabilitat (LSI), la mescla no s'inflamarà perquè és massa rica en combustible.

D'altra banda, segons sigui el grau de confinament i la presència d'obstacles al seu interior, podem tenir dos tipus de comportament: deflagració o detonació.

Tal com s'ha explicat en el punt 3.2.1, en el cas d'una detonació el valor de la sobrepressió que s'assoleix és molt superior i en un temps inferior al cas de la deflagració, i això fa que les conseqüències de l'accident sigui pitjors.

En cas d'una deflagració, si es tracta d'un edifici, pot passar que la teulada salti i les parets es desplomin. Si es tracta d'un recipient (cisterna per exemple), la sobrepressió pot deformar el recipient i, fins i tot, provocar el seu trencament catastròfic, fent que el contingut surti a l'exterior. No obstant això, els efectes a l'exterior solen ser reduïts.

En cas de detonació, els efectes són més destructius i tenen un abast en l'espai molt superior, cal tenir en compte aquí, a banda de l'ona de sobrepressió, la projecció de fragments a l'exterior, els quals poden arribar a distàncies molt elevades.

- Pols combustible en suspensió.

En aquest cas, es tracta de l'explosió d'un núvol de pols en un espai confinat, com per exemple sitges o dipòsits.

Perquè es doni una explosió d'aquest tipus cal que el sòlid sigui combustible, que es trobi finament dividit en partícules suficientment petites i que aquestes estiguin en suspensió en una quantitat d'aire suficientment gran com perquè cada partícula pugui

cremar lliurement. Com més petita és la mida de la partícula més fàcil és la seva ignició i més violenta l'explosió.

També cal que la barreja trobi un punt d'ignició, aquest pot venir de qualsevol petita flama, guspira elèctrica o superfície calenta.

En aquest tipus d'explosions, la generació de l'ona de pressió és un fenomen progressiu que s'inicia amb una combustió lenta de la barreja, la qual té un front de flama que avança en règim laminar. No obstant això, a mida que la reacció de combustió continua, el front de flama s'accelera degut a les turbulències generades per l'expansió dels gasos formats. Aquest augment de la velocitat del front de flama provoca un creixement de la sobrepressió, de manera que arriba un punt en què és possible l'autoignició de la mescla. És en aquest moment que, es produeix la transició de deflagració a detonació i pot arribar a causar l'esclat del contenidor.

Exemples de materials que poden experimentar aquest tipus d'explosions, si es troben en les condicions necessàries, són: cereals, lli, fibres, sucre, plàstics, pigments orgànics, pesticides, carbó i metalls com alumini, magnesi, zinc, ferro, etc.

Aquells materials que són estables en oxigen no experimenten aquest fenomen, com per exemple: silicats, fosfats, carbonats, etc.

3.2.4. Esclat de recipients.

El trencament d'un recipient pot ser degut a diferents causes: danys estructurals (corrosió, fatiga, defectes dels materials), agressions externes (impactes, acció directa de flames, etc.) o augment de la pressió interna (sobreomplentat, explosió interna, runaway, etc.)

En cas que es produeixi un augment de la pressió interior, els dipòsits, reactors, etc. disposen de sistemes de seguretat com vàlvules, discs de ruptura i altres, que són els que actuen en primera instància. En cas que aquests sistemes no siguin capaços de compensar l'augment de pressió, és quan el recipient esclata.

En aquest apartat només farem referència al fenomen de l'esclat del recipient, però cal tenir en compte que, simultàniament poden donar-se altres fenòmens perillosos segons quines siguin les característiques de la substància continguda a dins: fuita tòxica, flamarada, bola de foc, etc.

En el moment de l'esclat, l'energia del fluid s'inverteix en la formació de l'ona de pressió i la projecció de fragments. La severitat d'aquests fenòmens dependrà de l'energia interna del fluid, que va directament relacionada amb la quantitat de producte i les condicions d'emmagatzematge en què es trobi en el moment d'esclatar.

3.2.4.1. Gas comprimit.

És el cas en què un recipient que conté un gas pressuritzat explota, aquí l'única font d'energia per formar l'ona de pressió i per a la projecció de fragments és l'expansió del gas. L'energia alliberada depèn, principalment, de la pressió d'emmagatzematge i de la quantitat emmagatzemada.

3.2.4.2. BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion)

Una BLEVE és un tipus d'explosió mecànica. Les seves sigles, en la seva traducció al català, signifiquen "Expansió explosiva del vapor d'un líquid en ebullició".

Certament, el fenomen de la BLEVE s'entén normalment associat al fenomen de la bola de foc, explicat anteriorment en aquest document, però no necessàriament ha de ser així. Això només passarà en cas que la substància involucrada sigui inflamable i la mescla formada trobi un punt d'ignició, cosa aquesta última, força probable, ja que normalment una BLEVE s'inicia a causa d'un foc exterior que incideix directament en el dipòsit.

Si l'accident implica BLEVE i bola de foc, tindrem efectes tèrmics i mecànics, mentre que si només implica BLEVE, únicament tindrem efectes mecànics.

Hi ha accidents que poden confondre's amb una BLEVE, ja que es produeix un esclat del recipient i posteriorment, si la substància és inflamable, es dona la ignició del núvol, però no es tracta d'una BLEVE pròpiament dita, perquè per tenir una BLEVE cal que es compleixin algunes condicions concretes, que explicarem seguidament. De tota manera, cal saber que en una BLEVE no és necessària cap reacció química.

Les condicions que han de concórrer perquè es doni una BLEVE són:

1. Baixada sobtada de la pressió a l'interior del recipient.
2. Presència d'un líquid sobreescalfat.
3. Superació de la temperatura límit de sobreescalfament. Nucleació.

El descens de la pressió sol venir donat pel trencament del dipòsit, normalment per una pèrdua de resistència mecànica a causa de l'acció directa de les flames d'un incendi extern. També pot donar-se, però, per desprendiment del disc de ruptura o trencament per impacte o per sobrepressió interior.

En qualsevol cas, com major sigui el descens de la pressió, majors seran els efectes de la BLEVE, en cas de produir-se. La mida de l'obertura en el recipient o dipòsit serà determinant en la velocitat de la disminució de la pressió.

L'altra condició és que cal tenir el producte en estat líquid sobreescalfat. Això significa que hem de tenir un líquid o gas líquid a una temperatura superior a aquella que li correspondria si es trobés en equilibri amb el seu vapor. Aquest és un estat inestable que es dona en el moment en què la pressió del recipient disminueix sobtadament per igualar-se a la pressió exterior. Aleshores el líquid, inevitablement, es trobarà a una temperatura superior a la temperatura corresponent a la corba de saturació P-T per a la nova pressió. En aquestes condicions tenim un líquid sobreescalfat, però tot i així, no és suficient perquè es doni una BLEVE, cal que aquesta temperatura en el moment de la despressurització sigui superior a una temperatura anomenada "temperatura límit de sobreescalfament", que és diferent segons quin sigui el producte de l'interior del recipient.

El fet de no superar la temperatura límit de sobreescalfament no vol dir que no tinguem una situació perillosa, ja que un líquid en condicions de sobreescalfament pot donar lloc a un accident greu, però no correspondrà a una BLEVE.

En cas que la temperatura en el moment de la despressurització, sí que superi el valor de la temperatura límit de sobreescalfament, el que passarà és que es produirà una vaporització instantània de la major part del líquid, el qual sortirà a l'exterior arrossegant al líquid romanent en forma de fines gotes que s'aniran vaporitzant posteriorment.

Aquesta vaporització sobtada provoca un extraordinari augment de volum respecte del líquid inicial (unes 1700 vegades en cas de l'aigua i unes 250 vegades en cas del propà) i juntament amb l'expansió del vapor preexistent donen lloc a una ona de pressió i a la projecció de fragments provinents de l'esclat del recipient.

Un líquid sobreescalfat es troba fora del seu estat d'equilibri (hauria de trobar-se en fase gas) i, si en aquest moment és exposat a un descens sobtat de pressió, és possible que pateixi una nucleació² espontània que dona lloc a la vaporització sobtada. De fet, si la temperatura del líquid sobreescalfat en el moment de la despressurització és superior a la temperatura límit de sobreescalfament, es donarà la nucleació. En cas que la temperatura del líquid sobreescalfat estigui per sota de la temperatura límit, la nucleació no tindrà lloc.

Si aquesta nucleació espontània és homogènia afectarà a tota la massa i l'explosió serà molt violenta. En cas que la nucleació espontània sigui heterogènia es localitzarà més en zones de contacte amb la paret interior, aleshores no afectarà a tota la massa en el seu conjunt i l'explosió no serà tant violenta. De tota manera, cal mirar d'evitar les nucleacions heterogènies perquè també són perilloses en sí mateixes, ja que poden donar-se en condicions de sobreescalfament focalitzat sense arribar a la temperatura límit.

3.2.5. Càlcul de magnituds en les explosions.

En cas d'explosió, les conseqüències més immediates per a les persones exposades són a causa de l'acció de l'ona de sobrepressió i la projecció de fragments.

Les magnituds que ens permetran avaluar la severitat d'aquests fenòmens perillosos són:

Ona de sobrepressió: valor màxim de sobrepressió estàtica (P_s) i impuls (i).

Projecció de fragments: impuls mecànic dels fragments.

A banda de la sobrepressió i l'impuls, cal tenir en compte també dues magnituds més que són importants a l'hora de calcular les conseqüències i van associades a la generació d'una ona de pressió: la sobrepressió reflectida (P_r) i la pressió dinàmica (Q). La **pressió reflectida** (P_r) és, igual que P_s , una pressió estàtica que s'assoleix en el moment en què el front de l'ona xoca amb un cert angle amb una superfície sòlida, rígida i plana. L'ona reflectida viatja en sentit oposat a l'ona incident i amb una velocitat superior, ja que es desplaça a través d'aire precomprimit i preescalfat.

La **pressió dinàmica** (Q) es genera a conseqüència del vent de l'explosió, arrossegat per l'avenç de l'ona generada. La pressió dinàmica és la responsable del desplaçament d'objectes lliures (no subjectats).

Segons TNO, Q és pot calcular mitjançant la següent expressió:

² Nucleació és l'inici d'un canvi d'estat en una regió petita però estable. En el nostre cas, la nucleació és la formació de bombolles de vapor que afavoriran el canvi de fase de líquid a vapor.

$$Q = \frac{1}{2} \rho U^2$$

on, ρ és la densitat de l'aire (kg/m^3) a la pressió màxima de l'ona i U és la velocitat de desplaçament de l'ona (m/s).

Q també pot expressar-se en funció de la sobrepressió estàtica, (TNO)

$$Q = \frac{5}{2} \left(\frac{P_s^2}{7P_0 + P_s} \right)$$

La pressió dinàmica sol ser sempre menor que la sobrepressió estàtica, perquè Q sigui major que P_s es necessiten valors de P_s superiors a $5 \cdot 10^5$ Pa, que són valors pràcticament inassolibles fora de punts molt propers a l'origen de l'explosió.

El valor de la pressió reflectida (P_r) és funció de la sobrepressió estàtica (P_s) i de la pressió dinàmica (Q), segons l'expressió:

$$P_r = 2P_s + [\gamma + 1]Q$$

Atès que per l'aire $\gamma=1.4$ i d'acord amb l'expressió de Q , tenim que:

$$P_r = 2P_s \left(\frac{7P_0 + 4P_s}{7P_0 + P_s} \right)$$

Per tant, per a ones de xoc febles, on tindrem valors de P_s baixos ($P_s \ll P_0$), la pressió reflectida serà aproximadament el doble de la sobrepressió estàtica, mentre que per a ones de xoc intenses, on tindrem valors de P_s importants ($P_s \gg P_0$), P_r s'aproxima a 8 vegades la sobrepressió estàtica.

Per al càlcul de les magnituds que necessitem per avaluar la severitat en cas d'explosions existeixen diferents mètodes: el mètode TNT, el mètode multienergia, el mètode Baker, etc.

Seguidament, s'explicaran de forma general el mètode TNT i el mètode Multienergia, que són, potser, els dos mètodes utilitzats de forma més habitual.

Aquestes metodologies segueixen uns passos similars:

1. Determinar l'energia total involucrada en l'explosió i la part d'aquesta energia que s'inverteix en la generació de l'ona de pressió.
2. Determinar la distància escalada, la qual depèn de l'energia de l'explosió i de la distància entre l'origen de l'accident i el punt que rep l'impacte de l'ona.
3. Determinar els valors de sobrepressió i impuls a partir d'uns gràfics basats en relacions empíriques o semiempíriques entre aquestes magnituds i la distància escalada.

3.2.5.1. Mètode TNT

El TNT és un dels explosius més utilitzats, principalment en el camp militar, i per aquest motiu els seus efectes han estat molt estudiats i tabulats. Això permet que es puguin conèixer amb força fiabilitat els valors de P_s i impuls d'una ona generada per l'explosió d'una determinada quantitat de TNT a una distància concreta de l'origen de l'explosió.

El mètode TNT equivalent permet calcular les conseqüències de qualsevol substància explosiva per comparació de l'energia alliberada amb la que alliberaria una quantitat equivalent de TNT que produís els mateixos efectes.

La relació entre l'energia alliberada en una explosió (E_{exp}), sigui quin sigui el seu origen: explosiu, núvol o dipòsit, i la quantitat equivalent de TNT (W_{TNT}) ve donada per la següent expressió:

$$W_{TNT} = \alpha \frac{E_{exp}}{4.6 \cdot 10^6}$$

On α és el factor d'eficiència de l'explosió i $4,6 \cdot 10^6$ J/kg és l'energia alliberada per l'explosió d'1 Kg de TNT

En una substància explosiva: $E_{exp} = W_{exp} \Delta H_{exp}$

On W_{exp} és la massa de substància explosiva (kg) i ΔH_{exp} és l'entalpia de reacció de l'explosió (J/kg).

En cas de núvols de vapor, s'afegeix un problema perquè cal calcular quina és la quantitat de combustible que es troba dins dels límits d'inflamabilitat. En cas de no ser possible dur a terme aquesta correcció, es poden fer els càlculs amb la quantitat total de combustible involucrada en el núvol i estarem tenint en compte els pitjor dels casos. Per tant, $E_{exp} = W_c \Delta H_c$

On W_c és la quantitat de combustible (kg) i ΔH_c és l'entalpia de combustió (J/kg)

El paràmetre α és el factor d'eficiència de l'explosió, és a dir, representa el rendiment de l'explosió, que ens diu quina és la fracció de l'energia alliberada que s'inverteix en generar l'ona de pressió. La determinació d'aquest paràmetre és la que confereix major dificultat i incertesa a aquest mètode.

En el cas de substàncies explosives el factor d'eficiència és màxim, per tant, $\alpha=1$. En el cas de núvol de vapor, l'eficiència de l'explosió és baixa perquè la major part de l'energia alliberada es dissipa en forma de calor, invertint-se només una petita part en generar l'ona de pressió.

Segons quina sigui la bibliografia consultada es poden trobar diferents valors de α dins el rang de $2 \cdot 10^{-4}$ i 0,159. El que sí que es pot afirmar és que l'eficiència de l'explosió depèn de certes característiques, essent major com:

Major sigui el grau de confinament

Major sigui l'energia de la font d'ignició que provoca l'explosió

Més homogènia sigui la mescla i més s'aproximi a la relació estequiomètrica

Com a criteri general, es poden prendre els valors d' α següents:

Substàncies poc reactives (hidrocarburs)	$\alpha=0.04$
Substàncies mitjanament reactives (òxid de propilè)	$\alpha=0.06$
Substàncies molt reactives (òxid d'etilè)	$\alpha=0.1$

Un cop determinada la quantitat de massa de TNT equivalent, podrem conèixer els valors de sobrepressió, impuls i duració de la fase positiva de l'ona a una distància determinada mitjançant una sèrie de gràfics on es representen aquests paràmetres

d'acord amb la distància normalitzada o escalada, la qual es pot calcular per l'expressió següent:

$$d_n = \frac{d}{\sqrt[3]{W_{TNT}}} \quad (\text{m/kg}^{1/3})$$

On d és la distància des de l'origen de l'explosió al punt on es vol determinar la sobrepressió i l'impuls mecànic.

Tal com hem dit, els gràfics donen el valor de la magnitud de P_s en funció del valor de d_n . En el cas del gràfic de l'impuls, el que s'obté és el valor de l'impuls normalitzat, a partir del qual es pot calcular l'impuls mecànic d'acord amb l'expressió:

$$i_{TNT} = \frac{i}{W_{TNT}^{1/3}} \quad (\text{Pa}\cdot\text{s/kg}^{1/3})$$

Cal tenir en compte que hi ha grans diferències entre una explosió de TNT i una explosió d'un núvol de vapor. És per aquest motiu, que el mètode del TNT equivalent té importants limitacions i els resultats obtinguts no sempre concorden amb els valors reals.

A distàncies properes a l'origen de l'explosió l'error comès amb aquest mètode és major que a distàncies més allunyades. Això és degut a que els perfils de l'ona de pressió en el cas de la detonació i la deflagració (veure punt 3.2.1) són molt diferents per a temps curts i es fan més semblants a mida que el temps de fase positiva és superior. La corba que representa el perfil d'una deflagració, per a punts més allunyats, s'aproxima més a l'ideal i per això l'error disminueix.

En el cas d'esclat de recipients, el mètode TNT no s'aconsella gaire per la incertesa del factor d'eficiència.

3.2.5.2. Mètode de Multienergia

Aquest mètode, desenvolupat per Van der Berg, suposa que quan es dona la ignició d'un núvol de vapor, les majors sobrepressions es donen a les parts confinades i en cadascuna d'aquestes regions de major confinament és on tenen lloc les subexplosions. L'explosió del núvol es considera com la suma de les diverses subexplosions, on el volum total que dona lloc a l'explosió seria la suma de volums de les zones confinades. Se suposa un núvol semiesfèric de radi R_0 i de concentració estequiomètrica i homogènia.

Existeixen gràfics que correlacionen la sobrepressió estàtica (P_s') i la duració de la fase positiva (tp') en la seva forma adimensional en funció de la distància escalada o normalitzada.

- Distància normalitzada:

$$R' = \frac{d}{(E_{\text{exp}}/P_0)^{1/3}}$$

on, P_0 és la pressió ambient i d és la distància des de l'origen de l'explosió al punt on es vol determinar la sobrepressió i l'impuls.

- Energia alliberada a l'explosió

$$E_{\text{exp}} = V_{\text{conf}} \rho c \Delta H_c$$

On, V_{conf} és el volum de la part del núvol que està confinada, ρ és la densitat de la substància explosiva, c és la concentració estequiomètrica del núvol en aire i ΔH_c és l'entalpia de combustió de la substància fuitada.

Per calcular els valors de sobrepressió, duració de la fase positiva i impuls, a partir dels valors obtinguts dels gràfics, caldrà utilitzar les expressions següents:

- Sobrepressió adimensional

$$P_s' = \frac{P_s}{P_0} \quad \text{on, } P_0 \text{ és la pressió ambient}$$

- Duració de la fase positiva adimensional:

$$t_p' = \frac{t_p \cdot c_0}{\left(\frac{E_{\text{exp}}}{P_0}\right)^{1/3}} \quad \text{on, } c_0 \text{ és la velocitat del so a l'aire (340 m/s)}$$

- Impuls mecànic: es determina suposant que el perfil sobrepressió-temps és triangular.

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

En cadascun dels gràfics on es representen les magnituds P_s' i t_p' en funció de R' , s'estipulen 10 nivells d'explosió. El nivell 1 correspon a una deflagració molt dèbil, mentre que el nivell 10 correspon a la detonació més intensa, la resta de valors són per situacions intermèdies.

Una de les principals dificultats del mètode de Multienergia es troba en seleccionar correctament el nivell d'explosió, ja que hi ha diversos factors que hi influeixen. La intensitat d'una explosió depèn principalment de la massa i reactivitat del combustible, del grau de confinament del núvol i de la intensitat de la font d'ignició.

No obstant això, a la bibliografia es poden trobar criteris que ajuden a decidir el nivell d'explosió correcte. El criteri proposat per TNO és, quan manca més informació, adoptar el nivell 7 per a explosions en àrees obstruïdes i el nivell 3 per a explosions en àrees sense obstacles.

Depenent de la informació disponible, es poden adoptar altres criteris, una mica més complexos, però que, permetran seleccionar el nivell d'explosió més idoni.

El mètode multienergia dona millors resultats que el mètode TNT quan es tracta d'explosions de núvols inflamables.

3.3. Fuites gasoses.

Quan fuita a l'atmosfera un producte de caràcter tòxic i/o inflamable se sol formar un núvol, bé sigui perquè la fuita es dona directament del producte en fase gasosa, bé sigui perquè el núvol prové d'una fuita del producte en fase líquida en condicions de vaporització.

Sigui quin sigui el cas, el núvol format es comporta diferent segons les condicions de sortida del producte, les propietats fisicoquímiques del producte, les condicions atmosfèriques (velocitat i direcció del vent, estabilitat atmosfèrica, temperatura, humitat, etc.) i l'entorn (orografia, presència d'estructures i obstacles).

D'entre els diferents tipus d'accidents que es poden donar a la indústria química, la formació de núvols és un dels escenaris més comuns i alhora més perillós. Moltes de les substàncies que s'emmagatzemen i utilitzen en aquest tipus d'indústria són perilloses per a la salut i medi ambient i, en cas de formació de núvols, és important conèixer la seva evolució, la qual cosa és força complexa, ja que, tal com s'ha dit al paràgraf anterior, depèn de multitud de factors.

En cas de núvols de substàncies inflamables, el perill ve determinat per la possibilitat que el núvol trobi un punt d'ignició i produeixi una flamarada o, fins i tot una explosió. En el primer cas el fenomen perillós associat és de tipus tèrmic (radiació tèrmica), mentre que en el segon cas també s'hi poden afegir fenòmens de tipus mecànic (ona de pressió). En aquest cas, caldrà tenir en compte el punt d'inflamació de la substància i els seus límits d'inflamabilitat.

Atès que els fenòmens perillosos de radiació tèrmica i sobrepressió ja s'han tractat en els punts anteriors, en aquest punt ens centrarem en el fuites de tipus tòxic.

En el cas de núvols tòxics la perillositat ve determinada pel grau de toxicitat de la substància i per la persistència i abast del núvol format.

Per tant, els dos elements principals que cal tenir en compte per preveure l'evolució d'una emergència derivada d'un fenomen de tipus tòxic són la toxicitat de la substància i la dispersió del núvol tòxic.

3.3.1. Classificació dels tòxics.

Es pot trobar més d'una definició per al concepte tòxic, però tenint en compte el context d'aquest document, una definició adient és la donada pel Diccionari de la Llengua Catalana: "Dit de l'element o compost químic que, en quantitats relativament petites, pot provocar la mort o malaltia dels òrgans a causa de les lesions estructurals o funcionals degudes a l'efecte químic".

Pel que fa a les vies d'entrada d'un tòxic a l'interior de l'organisme a causa d'una fuita, existeix la via oral (ingestió), dèrmica (absorció) i pulmonar (inhalació). Tot i així, en

aquest document només es tindrà en compte la darrera (inhalació), ja que, en cas de formació d'un núvol gasós, és la que actua amb major letalitat.

Les substàncies tòxiques es poden classificar atenent a diferents criteris.

a) Segons la naturalesa química del tòxic:

- Minerals o compostos inorgànics: metalls, metal·loides, àcids, bases, etc.
- Compostos orgànics: hidrocarburs, alcohols, aldehids, cetones, compostos nitrogenats, compostos sofrats, etc.

b) Segons el mecanisme i l'efecte que produeix la seva acció tòxica:

- Els que actuen a nivell respiratori (Neumotòxics)
- Els que actuen a nivell del sistema nerviós central (Neurotòxics)
- Els que provoquen alteracions digestives i hepàtiques (Gastroenterotòxics)
- Els que provoquen alteracions renals (Nefrotòxics)
- Els que afecten a la pell i a les mucoses (Dermatotòxics)
- Els que afecten al sistema circulatori (Cardiotòxics)
- Els que produeixen tumors (Carcinògens)
- Els que afecten a la sang i òrgans productors de la sang (Hematotòxics)
- Els que produeixen malformacions a l'embrió que no es transmeten a les generacions successives (Teratogènics)
- Els que alteren l'ADN, de manera que la mutació es transmissible a les generacions successives (Mutagènics)
- Els que afecten a l'aparell reproductor
- Els que afecten als sistema immunològic
- Els que provoquen alteracions de l'aparell locomotor.

c) Segons la seva toxicitat: (només se cita per inhalació, concentració letal 50, CL₅₀, en rates durant 4 hores)

- Extremadament tòxics (< 10 ppm)
- Altament tòxics (10 – 100 ppm)
- Moderadament tòxics (100 – 1000 ppm)
- Lleugerament tòxics (1000 – 10000 ppm)
- Pràcticament no tòxic (10000 – 100000 ppm)
- Relativament innocu (>100000 ppm)

Els efectes produïts per una substància tòxica depenen també d'altres factors, a banda de la capacitat tòxica de la substància, com ara la velocitat d'absorció per part de l'òrgan o òrgans afectats i el temps d'exposició. Així mateix, cal tenir en compte la constitució física, edat, sexe, pes i estat de salut de l'element vulnerable que rep la intoxicació.

Per tant, es pot trobar una gradació tant en el grau de toxicitat d'una substància com en els efectes possibles i s'estableix una relació entre la dosi que rep un organisme i l'efecte que li provoca. A aquesta relació se l'anomena **relació dosi – resposta**.

El concepte de dosi relaciona en una mateixa expressió la concentració i el temps d'exposició. La idea general és que cada substància té una quantitat per sota de la qual

no produeix efectes nocius, mentre que, en augmentar aquesta quantitat per sobre d'un determinat llindar els danys que provoca sobre els individus van creixent.

Es poden distingir tres tipus d'intoxicacions:

- Intoxicació aguda: quan l'aparició del quadre patològic es dona gairebé immediatament després de la inhalació de la substància tòxica. La seva evolució tant pot comportar la mort de l'individu com la seva recuperació total o parcial.
- Intoxicació subaguda: situació intermèdia entre la intoxicació aguda i la crònica.
- Intoxicació crònica: produeix el deteriorament progressiu de l'estat de salut de l'individu amb una evolució lenta, podent arribar a ser irreversible.

En el cas del transport de MMPP, quan parlem d'un accident per fuga tòxica, el que es considera és una fuga de gran quantitat de substància tòxica, la qual té una toxicitat elevada. Per tant, el tipus d'intoxicació que ens ocupa és la intoxicació aguda.

El tipus d'intoxicació crònica és més usual en l'àmbit laboral, en el qual els treballadors poden estar exposats a petites quantitats de substàncies, de vegades d'un nivell de toxicitat inferior, però durant períodes de temps d'exposició molt llargs.

3.3.2. Concentració i dosi de les substàncies tòxiques.

Deixant de banda els efectes a mig i llarg termini de les substàncies tòxiques, és a dir, tenint en compte només els efectes immediats, podem classificar els tòxics en dos grups segons la magnitud de què depengui el dany causat: les substàncies els efectes de les quals són funció de la **dosi** i les substàncies els efectes de les quals són funció de la **concentració**.

En cas que els efectes del tòxic depengui de la dosi, aquests tòxics es denominen també "dependents del temps", mentre que en cas que els efectes del tòxic depengui de la concentració, es diu que tenen un "valor sostre".

Quan parlem de dosi, s'inclou dins un mateix concepte dues variables: concentració i temps. En cas d'inhalació, la dosi rebuda està definida per la combinació factorial de la concentració de la substància tòxica a l'aire (c) i el temps d'exposició a aquesta substància tòxica (t_{exp}), a través l'equació de ten Berge (1986):

$$D = c^n t_{exp}$$

On l'exponent, n, pot tenir valors entre 0,8 i 4, predominant els valors superiors a la unitat. En cas que $n=1$ se segueix la llei de Haber. En cas que es conegui el valor de n per a una substància concreta, es poden determinar les parelles concentració – temps que produeixin una mateixa dosi, és a dir, un mateix efecte.

Aquelles substàncies tòxiques que són molt reactives sobre els teixits vius provoquen en temps molts curts efectes corrosius, irritants o altres tipus de danys. Aquests tipus de substàncies són les que depenen de la concentració, ja que al tenir una elevada reactivitat, el temps d'exposició no és el que marca el dany. Per tant, es diu que tenen

un valor sostre, que és la concentració que no ha de ser superada en cap cas encara que el temps d'exposició sigui mínim.

D'altra banda, les substàncies tòxiques que no són tant reactives són les que s'anomenen dependents del temps. Això vol dir que per causar un mateix nivell de dany en un temps més curt d'exposició cal una concentració més elevada i, en canvi si la concentració a l'aire és menor, per assolir el mateix nivell de dany, el temps d'exposició ha de ser més elevat.

Així doncs, si suposem que $n=1$, llei de Haber, l'equació quedarà:

$$D = c t_{\text{exp}}$$

Per tant, per assolir un mateix valor de D podem tenir diferents parelles concentració – temps d'exposició, on si un factor augmenta l'altre disminueix.

De tota manera, cal remarcar que tota substància dependent del temps arribarà a ser dependent de la concentració en algun moment. És a dir, que a mida que disminuïm el temps d'exposició podem augmentar la concentració suportable abans de rebre el dany, però això és així fins a un determinat valor de la concentració, el qual si és superat, per molt que disminuïm el temps d'exposició, causarà un dany inevitablement. Aquest valor màxim que no es pot superar en cap cas és el que anomenem el valor sostre

3.3.3. Llindars de toxicitat.

L'estudi de valors llindars de diferents substàncies tòxiques, que no han de ser superats en cas d'exposició, va ser iniciat a la dècada de 1930 per diferents països i, principalment, es va orientar a l'àmbit laboral. Posteriorment, es va estendre l'estudi a valors llindars per a tòxics en cas de situacions d'emergència a causa d'accidents que produïssin l'emissió a l'atmosfera de grans quantitats de substància.

Tot i així, els problemes són diversos: es requereix inversió econòmica, no hi ha criteris homogenis per a la determinació d'aquests llindars entre les diferents organitzacions especialitzades i, a més, la determinació d'aquests valors es basa en l'experimentació amb animals, per tant, cal extrapolar els resultats als éssers humans, la qual cosa introdueix un factor d'incertesa.

Actualment, els índexs amb major prestigi a nivell internacional i més utilitzats són:

- AEGL
- ERPGs
- TEELs

Aquests són els tres índexs que utilitza la directriu bàsica de protecció civil per al control i planificació davant del risc d'accidents greus en el quals intervenen substàncies perilloses (RD 1196/2003, de 19 de setembre) per establir els llindars de les zones d'intervenció i d'alerta.

3.3.3.1. AEGL (Acute Exposure Guideline Levels)

Proposats per la Environmental Protection Agency (EPA) dels EUA, actualment han estat adoptats per organitzacions d'altres països atesa la seva reconeguda credibilitat científica.

Els AEGLs són uns llimdars que tenen per objectiu descriure el risc humà que resulta d'una exposició única o molt poc freqüent a la vida als productes químics en l'aire. La darrera actualització és de l'any 2012.

Característiques:

- Els AEGLs representen els llimdars d'exposició que són aplicables a la població en general, incloent-hi els nadons, els nens i altres persones que puguin ser susceptibles, però excloent-hi les hipersusceptibles.
- Es determinen per a períodes d'exposició d'emergència que van des de 10 minuts fins a les 8 hores. Aquesta multiplicitat de valors permet la realització d'interpolacions fiables dins els intervals de temps on s'ha calculat els valors. A més, permet veure ràpidament si un tòxic és dependent del temps (dosi) o té un valor sostre. Alguns tòxics mostren un valor sostre per al nivell de dany AEGL-1 i, en canvi, una dependència del temps per a nivell de dany superiors (AEGL-2 i AEGL-3)

Nivells de dany:

- **AEGL 1:** Concentració a/per sobre de la qual es prediu que la població general, incloent-hi individus susceptibles però excloent-hi els hipersusceptibles, pot experimentar una incomoditat notable. Les concentracions per sota de l'AEGL-1 representen nivells d'exposició que produeixen una olor lleugera, gust o una altra irritació sensorial lleu.
- **AEGL 2:** Concentració a/per sobre de la qual es prediu que la població general, incloent-hi individus susceptibles però excloent-hi els hipersusceptibles, pot experimentar a llarg termini efectes seriosos o irreversibles o veure impedita la seva capacitat per escapar. Les concentracions per sota de l'AEGL-2 però per sobre de l'AEGL-1 representen nivells d'exposició que poden causar un malestar notable.
- **AEGL 3:** Concentració a/per sobre de la qual es prediu que la població general, incloent-hi individus susceptibles però excloent-hi els hipersusceptibles, pot experimentar efectes amenaçadors per a la vida o, fins i tot, provocar la mort. Les concentracions per sota de l'AEGL-3 però per sobre de l'AEGL-2 poden causar efectes seriosos o irreversibles o veure impedita la seva capacitat per escapar.

3.3.3.2. ERPG (Emergency Response Planning Guidelines)

Han estat desenvolupats per la American Industrial Hygiene Association (AIHA)

Característiques:

- Els ERPG són llimdars aplicables a la població en general, encara que pot passar que individus molt susceptibles pateixin efectes per sota dels llimdars establerts.
- Només es determinen per a un temps d'exposició d'1 hora.

Nivells de dany:

- **ERPG-1:** És la màxima concentració a l'aire per sota de la qual es creu que gairebé tots els individus poden estar exposats fins a una hora experimentant només efectes adversos lleugers i transitoris o percebent una olor clarament definida.
- **ERPG-2:** És la màxima concentració a l'aire per sota de la qual es creu que gairebé tots els individus poden estar exposats fins a una hora sense experimentar o desenvolupar efectes seriosos o irreversibles o símptomes que puguin impedir la possibilitat de portar a terme accions de protecció.
- **ERPG-3:** És la màxima concentració a l'aire per sota de la qual es creu que gairebé tots els individus poden estar exposats fins a una hora sense experimentar o desenvolupar efectes que amenacin la seva vida.

3.3.3.3. TEEL (Temporary Emergency Exposure Limits)

Han estat desenvolupats pel Subcommittee on Consequence Assessment and Protective Actions (SCAPA) del Departament d'Energia del Estats Units d'Amèrica.

Característiques:

- Els TEELs són límits aplicables a la població en general.
- Només es determinen per a un temps d'exposició de 15 minuts.

Nivells de dany:

- **TEEL 0:** És la concentració per sota de la qual la major part de les persones no experimentaria efectes apreciables sobre la seva salut.
- **TEEL 1:** Màxima concentració en aire per sota de la qual es creu que gairebé tots els individus experimentarien efectes lleugers i transitoris sobre la salut o percebrien una olor clarament definida.
- **TEEL 2:** Màxima concentració en aire per sota de la qual es creu que gairebé tots els individus podrien estar exposats sense experimentar o desenvolupar efectes sobre la salut seriosos o irreversibles, o símptomes que puguin impedir la possibilitat de dur a terme accions de protecció.
- **TEEL 3:** Màxima concentració en aire per sota de la qual es creu que gairebé tots els individus podrien estar exposats sense experimentar o desenvolupar efectes amenaçadors per a la seva vida.

3.3.4. Interpolació dels índexs de toxicitat.

De vegades ens interessarà calcular la concentració màxima per tal de no superar uns efectes determinats sobre l'ésser humà a temps d'exposició diferents dels que estan tabulats. Això és possible fent una interpolació per a temps de pas de núvol diferents als de referència.

El cas dels índexs AEGL són els que permeten fer una interpolació més fiable, ja que estan calculats per a diferents temps d'exposició per a cada nivell de dany.

Primerament, es determinen la dosi (D) i l'exponent (n), utilitzant els índexs (AEGL) dels temps de referència dins dels quals es troba el temps de pas que es vol calcular, amb l'expressió següent:

$$D = C_{m\grave{a}x}^n \cdot t_{exp}$$

Aleshores, un cop coneguts D i n, es troba la nova concentració màxima (Cmàx) corresponent al temps de pas de núvol que ens interressi, a partir de l'expressió següent:

$$C_{m\grave{a}x} = \left(\frac{D}{t_p} \right)^{1/n} \quad \text{essent } t_p \text{ el temps de pas de núvol}$$

Per a temps de pas de núvol inferiors al menor període disponible, cal considerar que el tòxic és dependent de la concentració, valor sostre. Mentre que per a temps de pas de núvol superiors al major període disponible, es pot aplicar la llei de Haber, on considerem l'exponent, n, igual a la unitat.

$$C_{m\grave{a}x,x} = AEGL - X_{8h} \cdot \left(\frac{8}{t_p} \right) \quad \text{per a } t_p > \text{ a 8 hores}$$

On t_p està expressat en hores i X fa referència al nivell de dany causat (1, 2 o 3)

En cas que s'utilitzin els llindars ERPG o TEEL, no es disposa de les combinacions concentració – temps per als diferents nivells de dany, sinó que el valor és únic. En cas dels ERPG, el llindar està calculat per a un temps d'exposició de 60 minuts i en el cas dels TEEL, el llindar està calculat per a un temps d'exposició de 15 minuts.

La metodologia és la mateix que abans per als casos de temps de pas de núvol inferior al menor període de referència i el cas de temps de pas de núvol superior al major període de referència disponible. És a dir, per a temps inferiors als 60 minuts, en el cas dels ERPG, o 15minuts, en el cas dels TEEL, es recomana considerar que la concentració és un valor sostre.

En el casos de temps de pas de núvol superiors a 60 minuts (ERPG), o 15 minuts (TEEL), es recomana aplicar la llei de Haber, obtenint les expressions següents:

$$C_{m\grave{a}x,x} = ERPG - X \cdot \left(\frac{60}{t_p} \right) \quad \text{per a } t_p > \text{ a 60 minuts}$$

$$C_{m\grave{a}x,x} = TEEL - X \cdot \left(\frac{15}{t_p} \right) \quad \text{per a } t_p > \text{ a 15 minuts}$$

On t ve expressat en minuts i X fa referència al nivell de dany seleccionat.

3.3.5. Dispersió de núvols.

En els casos en què tenim una emergència on es genera un núvol gasós d'una substància perillosa, sigui perquè té caràcter tòxic o inflamable, un dels aspectes més importants és conèixer l'evolució de la dispersió d'aquest núvol en el temps i l'espai.

Existeixen diferents modelitzacions per estudiar la dispersió de núvols, que tenen en compte les diferents variables que li afecten.

Tot i que aquests models es basen en aproximacions són una eina molt important per determinar l'evolució i predir els efectes i conseqüències del núvol generat.

A continuació veurem de forma descriptiva els diferents paràmetres que afecten a la dispersió i formació de núvols.

Aspectes que condicionen l'evolució d'un núvol gasós:

- Tipus de fuga:
 - Contínua
 - Instantània
- Tipologia de núvol:
 - Gasos pesats
 - Gasos neutre o lleugers
- Condicions meteorològiques:
 - Vent
 - Estabilitat atmosfèrica
 - Temperatura, pressió i humitat relativa
- Condicions topogràfiques
 - Tipus de terreny, orografia
 - Presència d'obstacles

Queda palès, doncs, que hi ha múltiples factors que influeixen en l'evolució i dispersió de núvols gasosos, cosa que fa que sigui tant complicada la seva modelització.

La utilització de models permet simplificar i interpretar el fenomen, però cal tenir en compte els diferents paràmetres introduint els seus valors en el model utilitzat. Com major nombre de variables puguem introduir més acurat serà el resultat.

3.3.5.1. Tipus de fuga.

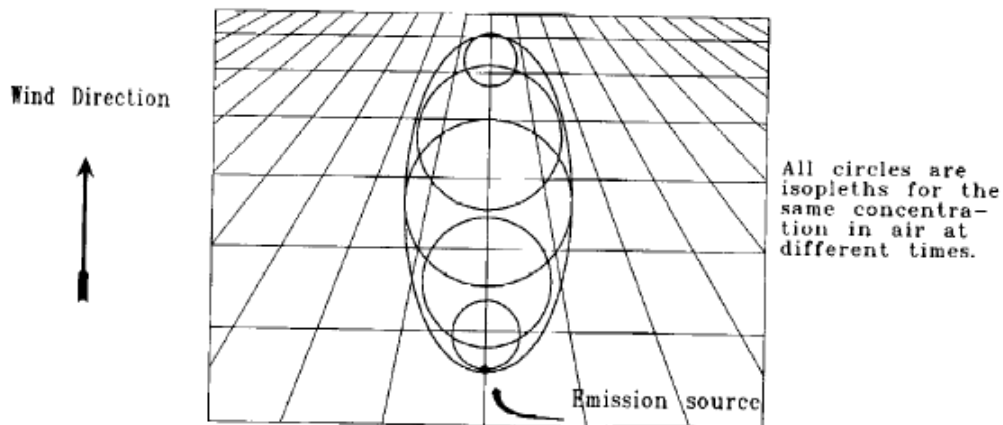
Atenent al temps de fuga, els principals tipus d'emissió que ens podem trobar són dos: contínua o instantània.

En el cas d'una emissió contínua el núvol s'alimenta permanentment de la font d'origen de la fuga, fins al seu tamponament, mentre que en una emissió instantània el temps transcorregut entre l'inici de l'emissió i la seva interrupció és molt més breu.

- **Fuga instantània:** quan el temps d'emissió és inferior al temps necessari perquè el núvol arribi a un punt determinat, per exemple una explosió d'un recipient que conté un gas.

Gràficament una fuga instantània s'associa a la imatge d'un núvol de gas, més o menys esfèric, que es desplaça movent el seu centre d'emissió en la mateixa direcció que el vent i a una velocitat similar a la d'aquest. Simultàniament a aquest fenomen de transport, el núvol de gas es va dispersant a causa de la interacció amb les molècules

d'aire, de manera que la grandària del núvol augmenta alhora que la concentració disminueix.

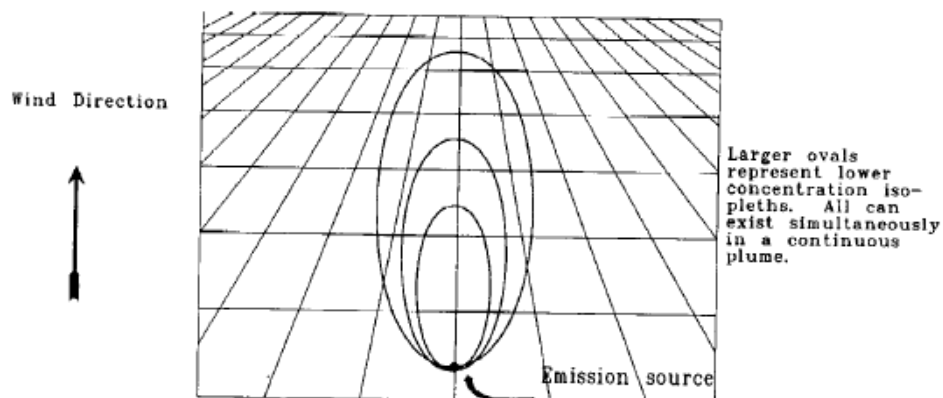


Evolució d'una fuga instantània.

Font: Handbook of Chemicals Hazard analysis procedures, by Battelle Columbus Division

- **Fuita contínua:** quan el temps d'emissió és superior al temps necessari perquè el núvol arribi a un punt determinat, per exemple el plomall de fum que surt d'una xemeneia.

El gràfic més representatiu és la imatge d'un núvol que adquireix una forma allargada (plomall) degut a la seva dispersió inicial pel vent, fins que assoleix un estat estacionari. És a dir, que l'aportació de gas contaminant a l'interior del núvol des de l'origen de la fuga és igual a la quantitat de gas contaminant que es dispersa a l'ambient.



Evolució d'una fuga contínua

Font: Handbook of Chemicals Hazard analysis procedures, by Battelle Columbus Division

A efectes pràctics, la divisió entre fuga contínua i instantània és una mica artificial atès que el temps de fuga sempre és finit i, per tant, es donarà un estat estacionari durant un temps i, finalment, tindrem la dispersió.

Per a una mateixa fuga, mentre que per a un observador proper al punt d'origen la fuga pot ser considerada com contínua, per a un observador més allunyat del punt d'origen la fuga pot ser considerada com instantània.

Un criteri utilitzat sovint per decidir si es considera la fuga instantània o contínua és el següent:

Tipus de fuga	Valor
Fuga instantània	$x > 1,8 \cdot u_w \cdot t_e$
Fuga contínua	$x < 1,8 \cdot u_w \cdot t_e$

On,

x = distància en la direcció del vent (m)

u_w = velocitat del vent (m/s)

t_e = temps de fuga (s)

3.3.5.2. Tipologia de núvol

Un altre factor molt important, alhora d'utilitzar el model matemàtic correcte per preveure l'evolució i dispersió d'un núvol gasós, és conèixer la tipologia de núvol.

Una característica molt important que condiciona l'evolució d'un núvol a l'atmosfera és la seva densitat. Existeixen tres possibilitats:

- Gas lleuger: densitat inferior a la de l'aire
- Gas pesat: densitat superior a la de l'aire
- Gas neutre o passiu: densitat similar a la de l'aire.

Com en el cas anterior, a efectes pràctics, és molt difícil tenir una fuga on el gas es comporti purament com un gas lleuger, neutre o pesat, atès que hi ha múltiples factors que hi intervenen. Així doncs, podem tenir un gas amb un comportament de gas pesat, sense tenir una densitat que correspongui a gas pesat, a causa d'altres variables com per exemple el pes molecular, la temperatura ambient, la temperatura del propi gas, la presència de partícules, reaccions químiques dins del núvol, etc.

Les fuites poden tenir lloc directament en fase gas, en fase líquida (de la qual s'origina la fuga gasosa per evaporació) o en fase mixta líquid – vapor. De vegades, quan dins del recipient hi ha emmagatzemat un producte amb presència de fase líquida i vapor, encara que la fuga sigui en fase vapor, és usual que arrossegui partícules líquides en forma de fines gotes. Aquest fet modifica la densitat i pot canviar el comportament del núvol de lleuger a pesat.

El fet que la fuga es produeixi en fase gas o líquida és important, també, alhora de calcular el cabal de fuga. En fuites líquides o mixtes l'aportació màssica és superior i, aleshores, és la velocitat d'evaporació la que marca la quantitat que s'aportarà per a la formació del núvol.

Per fer el càlcul del cabal de fuga també és important tenir en compte el tipus de trencament, cal saber si es tracta d'una fuga per trencament catastròfic o bé d'una

fuita per un orifici. I, en aquest últim cas, cal valorar el diàmetre de l'orifici en relació al del recipient, ja que aquesta relació afecta a la despressurització i a la velocitat de sortida.

Un cop es determina si la fuita es dona en fase líquida, gas o mixta i el tipus de trencament, caldrà utilitzar l'expressió matemàtica adequada per calcular el cabal màssic de fuita.

En aquest apartat no s'especifiquen aquestes expressions matemàtiques, les quals sí que es poden trobar a la bibliografia (González Ferradás, 2003) per a cada cas concret.

L'evolució d'un núvol gasós és molt diferent segons si es comporta com lleuger o pesat, per aquest motiu existeixen diferents programes informàtics de modelització, que bàsicament es poden classificar en dos grups:

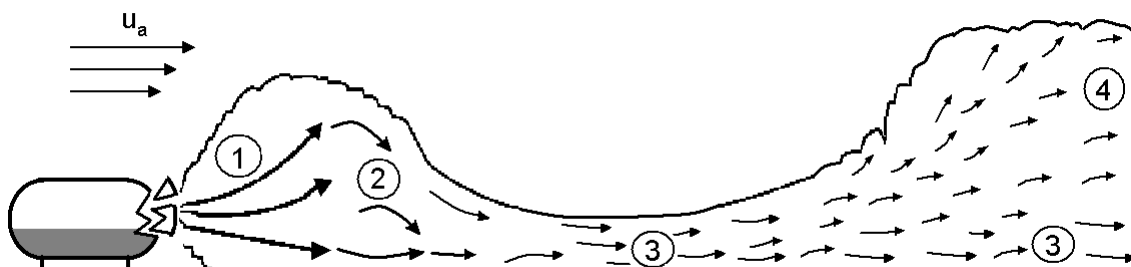
- Models per a gasos neutres gaussians.
- Models per a gasos pesats.

Comportament d'un núvol pesat.

La formació i evolució d'un núvol pesat es pot dividir en les següents etapes:

1. **Emissió:** en funció de les característiques del contenidor, de les característiques termodinàmiques de la substància, de les condicions d'emmagatzematge (pressió i temperatura) i de la posició i mida del trencament, el fluid sortirà a l'exterior en forma monofàsica (líquid o gas) o en forma bifàsica. El líquid s'extindrà sobre el terra i posteriorment s'anirà evaporant.
2. **Abatiment sobre el terra:** la densitat del núvol, superior a la de l'aire, produeix la caiguda del plomall immediatament després de l'elevació inicial deguda a l'impuls de sortida.
3. **Extensió i avenç per gravetat:** el núvol pesat s'estén pel terra adaptant-se a la geometria d'aquest. Les forces gravitatòries dominen a les forces de flotació i dispersió.
4. **Dispersió passiva:** la progressiva entrada d'aire fa disminuir la densitat de la interfase fins que les característiques termodinàmiques de la substància es fan similars a les de l'aire de l'entorn.

La següent imatge il·lustra gràficament totes les etapes esmentades.



Evolució d'un núvol dens

Font: guia tècnica. Zones de planificació per a accidents greus de tipus tòxics (González Ferradás, 2003)

Comportament d'un núvol lleuger.

Si la substància emesa a l'atmosfera té una densitat similar o menor a la de l'aire (gas neutre o lleuger), o bé si la mescla en el moment de l'emissió és molt intensa, de manera que la densitat del gas disminueix de forma ràpida, només es verificaran les etapes 1 i 4, és a dir, l'emissió i la dispersió passiva.

3.3.5.3. Condicions meteorològiques i topogràfiques.

En tots els programes informàtics que permeten fer modelitzacions de l'evolució de núvols gasosos és necessari introduir paràmetres relatius a les variables meteorològiques, ja que aquestes hi tenen una gran influència.

➤ Vent.

El vent arrossega el núvol i desplaça la massa de gas provocant la seva dispersió. Les dues components més importants són la velocitat i la direcció del vent.

De manera general, es pot afirmar que la concentració de producte fuitat és inversament proporcional a la velocitat del vent.

La velocitat del vent depèn de l'alçada, motiu pel qual és important referenciar el valor a una cota determinada. Les estacions meteorològiques permeten obtenir les dades de velocitat a una alçada de 10 metres.

La variació de la velocitat amb l'alçada es pot calcular mitjançant l'expressió:

$$U_w = U_{w0} \left(\frac{z}{z_0} \right)^\alpha$$

On,

U_w és la velocitat del vent a cota z

U_{w0} és la velocitat del vent a cota z_0

α constant que depèn de l'estabilitat atmosfèrica i de la rugositat del terreny

Classe d'estabilitat atmosfèrica	Valor d' α	
	Urbà	Rural
A	0,15	0,07
B	0,15	0,07
C	0,20	0,10
D	0,2	0,15
E	0,40	0,35
F	0,60	0,55

Pel que fa a la direcció del vent, aquesta condiona la direcció del transport i, per tant, el seu impacte amb el elements vulnerables que es puguin veure afectats. Conèixer les direccions del vent més probables en una determinada zona geogràfica és molt important per poder preveure la direcció en què es mourà el núvol.

La informació del vent, en una zona geogràfica concreta i en un període de temps determinat (mensual o anual) s'agrupa en una *rosa dels vents*, la qual ens dóna una representació gràfica de la freqüència dels vents segons la seva direcció i velocitat.

➤ Estabilitat atmosfèrica.

És una variable que s'utilitza per caracteritzar la capacitat que té l'atmosfera per dispersar un contaminant. En realitat és una mesura del grau de turbulència, la qual és resultat de les fluctuacions contínues i aleatòries del vent, tant de la direcció com de la velocitat, que provoquen moviments interns circulars els quals ajuden a la mescla de l'aire amb altres components.

La diferència amb altres paràmetres és que la turbulència és una variable que no es pot mesurar directament com temperatura o pressió, sinó que s'estima el seu valor mitjançant la velocitat del vent i la radiació solar.

La turbulència, a l'aire, té dos orígens: el mecànic i el tèrmic. D'una banda, la turbulència d'origen mecànic s'origina per la velocitat horitzontal de l'aire, la seva interacció amb el terra i amb els obstacles que hi hagi presents. D'altra banda, la turbulència d'origen tèrmic provoca els moviments verticals de l'aire i depèn en gran mesura del grau d'insolació que rep la terra.

Les diferents categories d'estabilitat atmosfèrica es classifiquen en 6 d'acord amb les classes de Pasquill:

Classe	Situació
A	Molt inestable
B	Inestable
C	Lleugerament inestable
D	Neutra
E	Lleugerament estable
F	Estable

Alguns autors amplien les categories a 7 amb la inclusió de la categoria G: Molt Estable.

Una categoria atmosfèrica inestable és aquella que es caracteritza per un moviment vertical important de la massa d'aire. Això és possible amb un gradient vertical de temperatura negatiu (temperatura disminueix al pujar en alçada), fluctuacions freqüents en la direcció del vent i una forta insolació.

Contràriament, una categoria atmosfèrica estable és aquella que es caracteritza per un règim laminar de les capes de l'aire. Això és possible amb un gradient vertical de temperatures positiu (inversió tèrmica), fluctuacions mínimes i baix nivell d'insolació.

➤ Temperatura i humitat relativa.

La variable de la temperatura és important perquè afecta a d'altres paràmetres dels quals depèn la dispersió d'un núvol, per exemple la densitat de l'aire i del núvol, la

pressió de vapor, fa augmentar l'evaporació i, tal com s'explica a l'apartat anterior, afecta a la turbulència.

A més, la temperatura també és important en cas que dins del núvol es donin reaccions químiques ja que pot afectar la seva cinètica, habitualment les accelera.

Pel que fa a la humitat relativa, és important sobretot, si la substància emesa és higroscòpica (amoníac, clorur d'hidrogen, etc.). Fins i tot, pot arribar a transformar un núvol lleuger o neutre en un núvol pesat degut a que augmenta el pes molecular de la substància després d'hidratar-se com a conseqüència de la seva combinació amb el vapor d'aigua.

En el cas d'emissions de gasos líquids a temperatures inferiors a la temperatura ambient (p.ex.: gas natural líquid, gasos líquids del petroli), cal tenir en compte el fenomen de la condensació del vapor d'aigua, la qual cosa fa variar la densitat relativa afavorint que el núvol es comporti com pesat.

3.3.5.4. Models de dispersió.

Els models de dispersió són models matemàtics que permeten preveure l'evolució d'un núvol gasós en el temps i l'espai donats una sèrie de paràmetres relatius al tipus d'emissió, condicions meteorològiques i característiques fisicoquímiques de la substància fuitada.

Tal com s'ha dit en el punt 3.3.5.2 el comportament d'un núvol pesat és molt diferent al d'un núvol lleuger o neutre, és per aquest motiu que existeixen models per gasos neutres (gaussians) i models per a gasos pesats.

➤ Models per a gasos neutres. (gaussians)

En la dispersió d'aquest tipus de núvols, les forces gravitatòries són compensades per les forces de turbulència atmosfèrica. Per aquest motiu, el núvol adquireix la dinàmica del vent i és transportat per aquest seguint una dilució segons el model de la campana de gauss. És a dir, el núvol es desplaça en la mateixa direcció que el vent, amb el màxim de concentració seguint la línia central de la trajectòria i els valors de concentració a les direccions transversals (x,y) presenten distribucions normals.

Dins d'aquest cas, cal diferenciar els casos de fuita instantània i fuita contínua (veure punt 3.3.5.1).

Fuita contínua:

En aquest tipus de fuita, la concentració en un punt determinat només depèn de la posició (x,y,z)

D'acord amb el model de Pasquill Gifford, que es fonamenta en una dispersió gaussiana en els eixos horitzontal i vertical, la fórmula és la següent:

$$C(x, y, z) = \frac{G}{2\pi \cdot U_w \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(\frac{-(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(\frac{-(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

On,

C és la concentració en un punt determinat (x,y,z) (kg/m³)

G és el cabal de l'emissió (kg/s)

h és l'alçada efectiva de l'emissió (m)

σ_y , σ_z són els coeficients de dispersió (desviacions típiques en les direccions lateral i vertical, que donen una idea de la dispersió del plomall) (m)

U_w velocitat del vent (m/s)

Per conèixer els valors de les desviacions típiques en funció de la distància es poden utilitzar les expressions següents, que són vàlides per a distàncies d'entre 100 m i 10 km.

$$\sigma_y = a \cdot x^b$$

$$\sigma_z = c \cdot x^d$$

On, x és la distància a l'origen de l'emissió i a, b, c i d són coeficients que depenen de l'estabilitat atmosfèrica.

Classe d'estabilitat	a	b	c	d
A	0,527	0,865	0,28	0,90
B	0,371	0,866	0,23	0,85
C	0,109	0,897	0,22	0,80
D	0,128	0,905	0,20	0,76
E	0,098	0,902	0,15	0,73
F	0,065	0,902	0,12	0,67

Coefficients per al càlcul de σ_y , σ_z segons la categoria d'estabilitat atmosfèrica, per a una rugositat, z_0 , igual a 0,1 i altures inferiors a 20 m.

Els valors de σ_y són valors promig per a un interval de 10 minuts i els de σ_z són vàlids per a una alçada de 20 metres i un valor de la rugositat del terreny z_0 igual a 0.1 m.

Per dur a terme les correccions de σ_z a causa de la diferent rugositat del terreny, es pot utilitzar l'expressió següent:

$$\sigma_z = c \cdot x^d (10 \cdot z_0)^{0.53x^{-0.22}} \text{ per a } 100 \text{ m} < x < 10.000 \text{ m}$$

On z_0 pren els següents valors en funció del tipus de terreny:

Tipus de terreny	z_0
Terreny pla sense arbres	0,03
Terreny pla amb arbres	0,10
Terra de conreu (amb hivernacles i cases aïllades)	0,30
Àrea residencial amb edificació de poca alçada	1,00
Àrea urbana amb edificis i estructures de grans dimensions	3,00

Els valors de σ_y no estan afectats per la rugositat del terreny.

Fuita instantània:

En el cas d'una fuita instantània, la concentració depèn de la posició i del temps transcorregut des de l'inici de la fuita.

D'acord amb el model gaussià, la concentració en un punt determinat (x,y,z) a un temps (t) ve donada per l'expressió:

$$C(x, y, z, t) = \frac{G}{(2\pi)^{3/2} \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \exp\left(-\frac{(x - U_w \cdot t)^2}{2 \cdot \sigma_x^2} - \frac{y^2}{2 \cdot \sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z - h)^2}{2 \cdot \sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z + h)^2}{2 \cdot \sigma_z^2}\right) \right]$$

On,

C és la concentració (kg/m³)

G és el cabal de l'emissió (kg/s)

h és l'alçada efectiva de l'emissió (m)

σ_x , σ_y i σ_z són les desviacions tipus en els eixos x, y, z (m)

U_w velocitat del vent (m/s)

Les expressions per calcular els coeficients de dispersió, en el cas de fuita instantània, són les següents:

$$\sigma_x = 0,13 \cdot x \text{ (per a totes les classes d'estabilitat atmosfèrica)}$$

$$\sigma_y = 0,5 \cdot \sigma_{yc}$$

$$\sigma_z = \sigma_{zc}$$

On,

σ_{yc} , σ_{zc} són els valors de les desviacions tipus en els eixos y i z per a les emissions contínues (m)

➤ **Models per a gasos pesats.**

Tal com ja s'ha explicat en punts anteriors, l'evolució d'un núvol gasós, ja sigui d'una substància inflamable o tòxica, és molt diferent segons si el núvol es comporta com un núvol lleuger o com un núvol pesat.

Les causes per les quals es pot generar un núvol pesat són diverses:

- Massa molecular de la substància fuitada superior a la de l'aire.
- Temperatura d'emissió suficientment inferior a la temperatura ambiental. Aquest fet pot invertir el comportament d'un núvol que inicialment, per la seva massa molecular, es preveuria com un núvol lleuger (per exemple: expansió de gasos emmagatzemats a pressions superiors a l'ambiental o evaporació de gasos líquids des de bassals).
- Formació d'aerosols (arrossegament de gotes de líquid amb la fase vapor)

- Presència de reaccions químiques dins del núvol de substància fuitada que poden donar lloc a altres substàncies de pes molecular superior.

En qualsevol cas, la formació d'un núvol pesat sempre comporta un major perill que un núvol lleuger, ja que la massa de vapor es desplaça arran de terra i això facilita la seva interacció amb els elements vulnerables. A més, en cas de núvol inflamable té més possibilitats de trobar un punt d'ignició i la dilució del núvol és més lenta que en el cas de gasos neutres.

Els models de dispersió de gasos pesats són força més complicats que els de gasos neutres o lleugers.

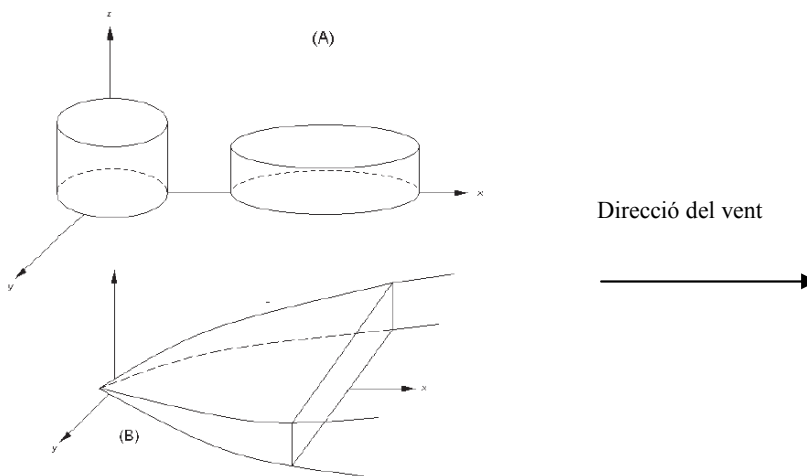
Aquest models han anat evolucionant des de plantejaments molt simples, en el seu inici, fins a sistemes de simulació actuals, els quals són molt complexos.

Inicialment es va intentar adaptar els models de dispersió neutra (gaussians) per a la dispersió densa. Això es va fer intentant modificar empíricament els paràmetres de difusió i els coeficients de dispersió. De tota manera, aquest intent de modelització es va desestimar ràpidament ja que els resultats no concordaven amb la realitat.

Actualment, existeixen dos categories de models:

Models de tipus caixa. Simulen el comportament del núvol des d'un punt de vista global sense tenir en compte les variacions de l'interior. Les seves hipòtesis més importants són:

- La dispersió es dona sobre un terreny pla.
- No es consideren fluctuacions de la concentració a l'interior del núvol.
- La morfologia de l'emissió instantània es modelitza com un cilindre cada cop més pla.
- Utilitza relacions específiques per descriure el creixement del radi i alçada del núvol instantani o l'amplada transversal a la direcció del vent i l'alçada del núvol quan es continuu.
- Es proposen expressions per al cabal d'entrada d'aire per la part alta i les bores del núvol, en funció de la velocitat de transferència de calor amb el sòl, la diferència de densitat amb l'atmosfera i del nivell de turbulència.
- La concentració s'obté per balanços de matèria.



Esquemes bàsics per models tipus caixa. A) fuita instantània B) fuita contínua.

Models numèrics o de tipus K. Simulen la dispersió del núvol tractant el procés dispersiu en les tres direccions de l'espai. Es basen en l'aplicació de les equacions de Navier Stokes per a la conservació de la massa de contaminant emès, de la massa total del sistema, de l'energia i de la quantitat de moviment en les tres direccions de l'espai, juntament amb una equació d'estat. Les expressions s'expressen en funció de la velocitat del vent, temperatura, densitat i concentració del contaminant. La resolució matemàtica dels sistemes d'equacions que implica aquest model és molt complexa i requereix de la utilització d'ordinadors de gran capacitat computacional.

4. VULNERABILITAT. EQUACIONS PROBIT.

Un cop conegudes les magnituds característiques (radiació tèrmica, sobrepressió, impuls o concentració tòxica) associades als diferents fenòmens perillosos de tipus tèrmic, mecànic o tòxic, cal poder relacionar-les amb les conseqüències que produeixen, principalment, sobre els éssers humans i en alguns casos també sobre béns materials com edificis o estructures.

La resposta que presenta un conjunt d'individus sotmesos a un mateix estímul no és homogènia, sinó que presenta un comportament estadístic que s'ajusta a una distribució logarítmico-normal. Aquest tipus de resposta s'observa també quan es tracta de quantificar danys produïts per fenòmens perillosos.

D'entre els diferents models de vulnerabilitat, es destaca el mètode PROBIT (PROBability unIT), que és un mètode estadístic que dona una relació entre la funció de probabilitat i una determinada càrrega d'exposició al fenomen perillós.

La fórmula utilitzada en el mètode probit es basa en una funció matemàtica lineal de caràcter empíric extreta d'estudis experimentals:

$$Y = a + b \ln V$$

On, Y és el probit o funció de probabilitat de dany sobre la població exposada, a i b són constants que es determinen experimentalment, les quals varien segons el tipus de dany considerat i el fenomen perillós que s'estigui estudiant i V és una mesura de la intensitat del fenomen perillós que causa el dany.

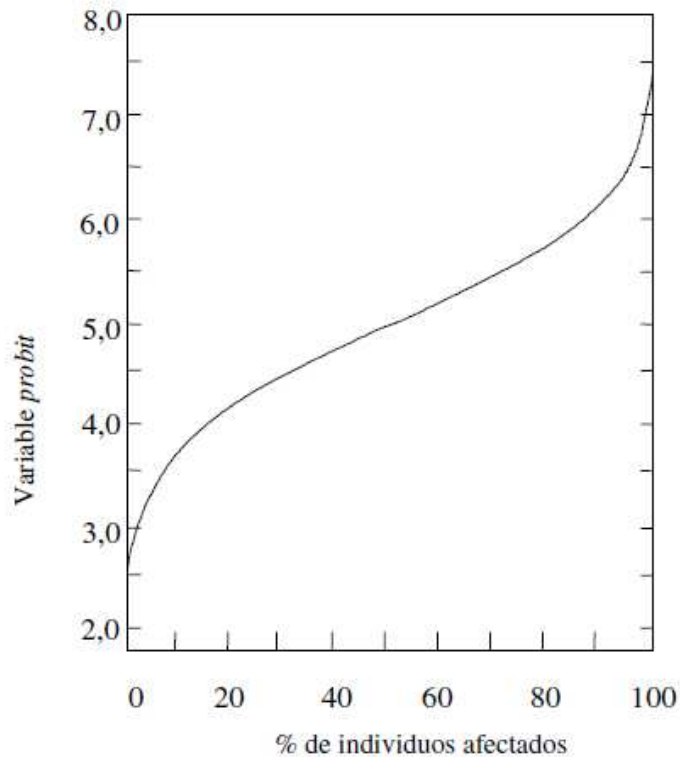
Així, la probit Y és una mesura del percentatge de població sotmesa a un determinat fenomen perillós d'intensitat V que rebrà un dany concret. Té una distribució normal, amb una mitja de 5 i una desviació estàndard d'1.

La relació matemàtica entre la variable probit (Y) i la probabilitat P és:

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{Y-5} \exp\left[-\frac{1}{2}u^2\right] du$$

Aquesta expressió matemàtica es pot representar gràficament o a través d'una taula de valors. En qualsevol cas, aquesta relació ens permetrà conèixer el percentatge de població exposada que resultarà afectada per un dany concret segons sigui el valor probit.

Aquest model només és aplicable als fenòmens en què es disposa d'equació probit.



Representació gràfica de la relació entre els valors probit i el percentatge de població afectada.

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

Valor de la función PROBIT

Relació entre valors probit i percentatge de població afectada (TNO)

4.1. Equacions Probit.

L'equació genèrica $Y = a + b \ln V$ adopta expressions diferents segons sigui el dany considerat i el tipus de fenomen perillós estudiat.

A continuació es fa esment d'algunes de les funcions probit per a cada fenomen perillós.

4.1.1. Fuita tòxica.

Per conèixer el percentatge de persones afectades per letalitat a causa de la inhalació d'una substància tòxica, cal substituir V per una expressió que es funció de la concentració de la substància tòxica i del temps d'exposició.

$$V = C^n \cdot t$$

On, C és la concentració (ppm), t és el temps d'exposició (minuts) i n és un paràmetre que es determina experimentalment.

Així la funció probit que cal utilitzar és:

$$Y = a + b \ln(C^n \cdot t)$$

On, a , b i n són diferents per a cada tòxic i la seva determinació és empírica. Per a les substàncies tòxiques més comunes, es poden trobar els valors d' a , b i n a la bibliografia.

En cas que la concentració del tòxic vingui donada en mg/m^3 , el valor de les constants seria diferents. També es pot transformar la concentració de mg/m^3 a ppm mitjançant l'equació següent:

$$C_{ppm} = C_{mg/m^3} \left(\frac{22,4 T_a}{M 273} \right)$$

On,

T_a = temperatura absoluta (K)

M = pes molecular de la substància contaminant

22.4 volum molar en litres d'un gas a 0°C i 1 atm.

Un cop conegut el valor probit (Y) per a una concentració i temps d'exposició determinats podem conèixer el percentatge de morts en una població a través de la taula que relaciona el valor probit amb el percentatge de població afectada.

Com a limitacions d'aquesta metodologia, cal dir que l'equació probit no és vàlida per a valors de concentració molt baixos i temps d'exposició perllongats, sinó que està pensada per a conseqüències agudes i immediates. En cas de conseqüències per exposicions cròniques cal utilitzar altres mètodes.

D'altra banda, en cas de mescles de gasos no es disposa dels valors de les constants de l'equació Probit. De moment, el mètode només es pot utilitzar per a substàncies pures referenciades. A més, de vegades per a una mateixa substància els valors de les constants a , b i n poden ser diferents segons la referència bibliogràfica utilitzada atès

que són valors que es determinen experimentalment i, sovint, no hi ha un metodologia definida.

4.1.2. Radiació tèrmica.

S'utilitza el mètode probit per determinar el percentatge de persones afectades pels efectes de la radiació tèrmica (cremades de diferent grau) en funció de la intensitat de radiació rebuda i el temps d'exposició (dosi de radiació tèrmica).

Segons la profunditat de les cremades, aquestes es classifiquen en cremades de primer, segon o tercer grau (de menor a major gravetat).

En cas de radiació tèrmica, a l'equació probit, caldrà substituir V per una expressió que és funció de la intensitat de radiació i del temps d'exposició.

$$V = t Q^{4/3}$$

On t és el temps d'exposició (segons) i Q és la intensitat de radiació (W/m^2)

Existeixen diferents equacions probit per avaluar les conseqüències de la radiació tèrmica, les proposades per TNO són:

➤ Cremades de primer grau:

$$Y = -39,83 + 3,0186 \ln(t Q^{4/3})$$

➤ Cremades de segon grau:

$$Y = -43,14 + 3,0188 \ln(t Q^{4/3})$$

➤ Mortalitat per cremades sense protecció:

$$Y = -36,38 + 2,56 \ln(t Q^{4/3})$$

➤ Mortalitat per cremades amb protecció:

$$Y = -37,23 + 2,56 \ln(t Q^{4/3})$$

Com a limitació d'aquesta metodologia cal dir que aquestes equacions probit són útils per a incendis de curta durada (flamarada, bola de foc), on no hi ha temps de fugir.

Es pot aplicar també a un incendi de basal, del qual es pot fugir i buscar protecció darrere d'obstacles. En aquest últim cas, es pot calcular el temps d'exposició efectiu a través de l'expressió següent, proposada per la TNO.

$$t_{ef} = t_r + \frac{3}{5} \frac{x_0}{\mu} \left[1 - \left(1 + \frac{\mu}{x_0} t_v \right)^{-5/3} \right]$$

On,

t_{ef} és el temps efectiu d'exposició (s)

t_r és el temps de reacció (5 segons)

x_0 és la distància al centre de l'incendi (m)

μ és la velocitat de fugida d'una persona (m/s) (se sol considerar 4 m/s)

t_v és el temps per arribar a la distància en què la intensitat de radiació sigui 1 kW/m^2

4.1.3. Explosions

Primerament, cal fer una distinció entre les conseqüències directes i indirectes sobre les persones a causa d'una explosió.

- Danys directes: són els que afecten als òrgans tous del cos humà, principalment al timpà i al pulmó.
- Danys indirectes: són els deguts al desplaçament del cos i col·lisió contra objectes o estructures.

A les funcions probit, que ens han de permetre determinar el percentatge de població afectada per un dany determinat (trencament de timpà, hemorràgia pulmonar, danys per desplaçament del cos, etc.), cal substituir V per alguna de les magnituds que marquen la severitat de l'ona de sobrepressió (sobrepressió i impuls) o per alguna funció dependent d'aquestes magnituds.

A continuació, es descriuen algunes de les funcions probit utilitzades per a cada tipus de dany, citades també per TNO.

- Trencament del timpà.

En aquest cas, a la funció probit cal substituir V únicament per la sobrepressió, ja que el dany no depèn de l'impuls mecànic de l'ona generada. Així la funció probit que dona el percentatge de població afectada, proposada per Hirsch, és la següent:

$$Y = -12,6 + 1,524 \ln P_s$$

- Mortalitat per hemorràgia pulmonar.

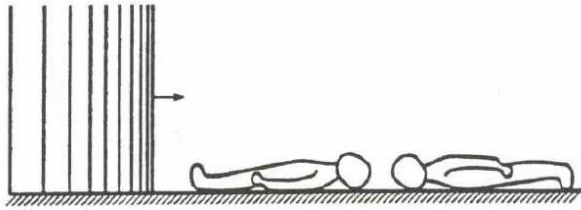
En aquest cas, l'equació probit més senzilla és la proposada per Eisenbert et al. (1975) on V és igual a la sobrepressió.

$$Y = -77,1 + 6,91 \ln P_s$$

De tota manera, existeixen altres equacions probit on V depèn de la pressió efectiva (P_{ef}) que actua sobre la caixa toràcica i també de l'impuls.

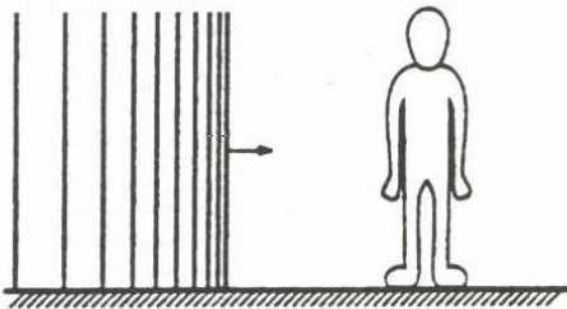
Cal distingir en aquest tipus de dany, la posició relativa de l'individu en front de l'ona que impacta. Així tenim els tres casos següents:

- Cas 1)



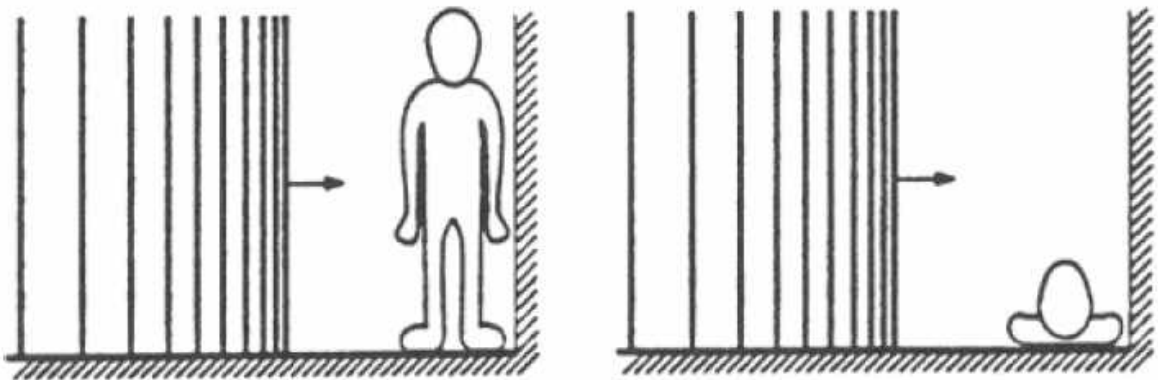
Cos humà en posició estesa, que ofereix la mínima resistència a l'ona.

- Cas 2)



Cos humà de peu, que ofereix la màxima resistència a l'ona.

- Cas 3)



Cos humà de peu o estès, al costat d'una estructura que provoca la reflexió de l'ona.

En cada cas la pressió efectiva és diferent.

En el primer cas (1), on l'eix longitudinal de l'individu és paral·lel a la direcció que avança l'ona, la pressió efectiva (P_{ef}) és igual a la sobrepressió estàtica (P_s).

$$P_{ef} = P_s$$

En el segon cas (2), on la direcció de l'ona és perpendicular a l'eix principal de l'individu, la pressió efectiva és la suma de la sobrepressió estàtica i la pressió dinàmica (Q).

$$P_{ef} = P_s + Q$$

En el tercer cas (3), on l'individu està al costat d'una estructura rígida que provoca la reflexió de l'ona, la pressió efectiva és igual a la pressió reflectida, essent indiferent que l'individu ofereixi o no resistència a l'avenç de l'ona.

$$P_{ef}=P_r$$

L'equació probit proposada per Baker et al., on V depèn de la pressió efectiva i de l'impuls és la següent.

$$Y = 5 - 5,74 \ln \left(\frac{4,2 \cdot 10^5}{P_{ef}} + \frac{1694}{i} \right)$$

➤ Dany per desplaçament i impacte del cos.

En una explosió, la sobrepressió provoca un impuls que arrossega els objectes i individus exposats a l'ona. Posteriorment aquests individus poden caure a terra i impactar amb objectes i estructures rígides provocant un dany.

Existeixen equacions probit proposades per Baker et al. que relacionen directament la sobrepressió de l'ona i l'impuls amb la probabilitat de mort per impacte del crani i de tot el cos.

🌿 Mortalitat per impacte en el crani:

$$Y = 5 - 8,49 \ln S$$

$$\text{On, } S = \frac{2,43 \cdot 10^3}{P_s} + \frac{410^8}{P_s i} \quad \text{vàlid per a } P_s < 4 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

🌿 Mortalitat per impacte de tot el cos:

$$Y = 5 - 2,44 \ln S$$

$$\text{On, } S = \frac{7,38 \cdot 10^3}{P_s} + \frac{1,310^9}{P_s i} \quad \text{vàlid per a } P_s < 4 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

5. BIBLIOGRAFIA.

- Casal, J.; Montiel, H.; Planas, E.; Vílchez, J.A. (1999). Análisis del riesgo en instalaciones industriales. Edicions UPC, Barcelona.
- González Ferradás, E., Ruiz Boada, F.J., Doval Miñarro M., Jimenez Sánchez T de J., Miñana Aznar, A., Ruiz Gimeno, J., Martínez Alonso, J., Román Fernández, S.; (2003). Zonas de planificación para accidentes graves de tipo tóxico Dpto. de Ingeniería Química de la Universidad de Murcia, Dirección General de Protección Civil. Ministerio del Interior.
- González Ferradás, E., Ruiz Boada, F.J., Miñana Aznar, A., Navarro Gómez, J., Ruiz Gimeno, J., Martínez Alonso, J.; (2002). Zonas de planificación para accidentes graves de tipo térmico. Dpto. de Ingeniería Química de la Universidad de Murcia, Dirección General de Protección Civil. Ministerio del Interior.
- NTP 291: Modelos de vulnerabilidad de las personas por accidentes mayores: método Probit (INSHT).
- NTP 293: Explosiones BLEVE (I): evaluación de la radiación térmica (INSHT).
- NTP 294: Explosiones BLEVE (II): medidas preventivas
- NTP 321: Explosiones de nubes de vapor no confinadas: evaluación de la sobrepresión (INSHT).
- NTP 329: Modelos de dispersión de gases y/o vapores en la atmósfera: fuentes puntuales continuas (INSHT).
- NTP 362: Fugas en recipientes y conducciones: emisión en fase líquida (INSHT).
- NTP 475: Modelos de dispersión de gases y/o vapores en la atmósfera: fuentes puntuales instantáneas (INSHT).
- Tesis Doctoral "Análisis de consecuencias y Zonas de Planificación para explosiones industriales accidentales (en el ámbito de las Directivas Seveso)" Diaz Alonso, F. (2006). Universidad de Murcia. Facultat de Química.
- TNO; (2005). Methods for the calculation of physical effects - The Yellow book – CPR 14E. Chapter 5; Vapour cloud explosions. W.P.M: Mercx y A.C. van den Berg. The Hague, (Holanda).

- TNO; (2005). Methods for the calculation of physical effects - The Yellow book – CPR 14E. Chapter 4; Vapour cloud dispersion. E.A. Bakkum y N.J. Duijm. The Hague, (Holanda).
- TNO; (1992). Methods for the determination of possible damage - The Green book – CPR 16E. The Hague, (Holanda).
- Com analitzar el risc del transport de mercaderies perilloses per carretera en un municipi. (Direcció General de Protecció Civil de la Generalitat de Catalunya. Departament d'Interior)
- Pla d'Emergència Exterior del Sector Químic de Catalunya (PLASEQCAT) (Direcció General de Protecció Civil de la Generalitat de Catalunya. Departament d'Interior)
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Acute Exposure Guideline Levels AEGLs. [<http://www.epa.gov/oppt/aegl/pubs/humanhealth.htm>, gener 2013]
- Universidad de Zaragoza. Centro Politécnico Superior. Departamento de Química Analítica. Grupo Universitario de Investigación Analítica de Riesgos (GUIAR). Análisis de consecuencias. [http://www.unizar.es/guiar/1/Accident/An_conse/Dispersion.htm, gener 2013]