

RESUM

Amb el desenvolupament industrial i tecnològic de la societat actual, la presència de productes tòxics i inflamables s'ha vist incrementada àmpliament en diferents sectors. La dispersió de fuites de substàncies perilloses que poden tenir lloc durant el transport o emmagatzematge d'aquestes, pot representar un risc important per a les persones i pel medi ambient. Per això, poder predir el comportament d'un núvol tòxic o inflamable representa un dels reptes més importants de l'anàlisi quantitativa del risc. El principal objectiu d'aquest treball és el d'aportar nous coneixements que siguin d'interès pels analistes de risc tecnològic a l'hora d'enfrontar-se a problemes de modelització de dispersió de certa complexitat, com ara aquells que ocorren en escenaris semi-confinats o amb presència de barreres.

La revisió bibliogràfica ha permès detectar que, tradicionalment, els models que més s'han emprat per analitzar la dispersió de fuites han estat els empírics i integrals, ja que aquests poden donar bones prediccions i de manera àgil en escenaris senzills sense obstruccions i en terreny pla. Tanmateix, en els darrers anys, l'ús d'eines CFD (Computational Fluid Dynamics) per a simular la dispersió de gasos s'ha vist incrementat, ja que aquests programaris permeten modelitzar escenaris més complexos. D'entre totes les eines CFD disponibles, el programari FLACS és el que mostra més potencial a l'hora de simular aquesta tipologia d'escenaris, però, com altres eines de la seva tipologia, encara requereix estudis complets de validació.

Aquest treball contribueix a la validació de l'eina FLACS per a la simulació i anàlisi de dispersions. Amb la informació obtinguda d'experiments de fuites de propà s'ha dut a terme un estudi de validació de la capacitat predictiva de l'abast visible del núvol de FLACS que podrà portar informació valuosa per analistes de risc per a tal de plantejar mesures de prevenció i protecció.

SUMARI

| | |
|---|----|
| RESUM | 1 |
| SUMARI..... | 2 |
| 1 GLOSSARI | 5 |
| 1.1 DEFINICIONS..... | 5 |
| 1.2 NOMENCLATURA..... | 6 |
| 2 PREFACI..... | 8 |
| 3 INTRODUCCIÓ..... | 9 |
| 3.1 OBJECTIUS..... | 9 |
| 3.2 ABAST | 9 |
| 3.3 FINALITAT | 9 |
| 4 ANTECEDENTS | 10 |
| 4.1 PROPIETATS DELS PRODUCTES LNG I LPG | 11 |
| 4.1.1 LNG | 11 |
| 4.1.2 GAS LIQUAT DE PETROLI..... | 13 |
| 4.2 IMPLICACIONS EN SEGURETAT DEL LNG I LPG | 16 |
| 4.2.1 EXEMPLES D'ACCIDENTS DE LNG I LPG..... | 17 |
| 4.2.2 ABAST VISIBLE D'UN NÚVOL DE GAS..... | 20 |
| 5 MODELITZACIÓ S MATEMÀTICA DE LA DISPERSIÓ DE GASOS | 22 |
| 5.1 DISPERSIÓ ATMOSFÈRICA..... | 22 |
| 5.2 MODELS MATEMÀTICS EXISTENTS | 24 |
| 5.2.1 MODELS EMPÍRICS..... | 24 |
| 5.2.2 MODELS INTEGRALS | 25 |
| 5.2.3 MODELS FÍSICS..... | 27 |
| 5.3 FLACS (Flame Acceleration Simulator) | 27 |
| 5.3.1 MODELS, RESOLUCIÓ NUMÈRICA I VARIABLES CLAU..... | 27 |
| 6 DESCRIPCIÓ DE LA INSTAL·LACIÓ EXPERIMENTAL I DE LES PROVES REALITZADES..... | 34 |

| | |
|---|----|
| 6.1 DESCRIPCIÓ GENERAL DE LA INSTAL·LACIÓ EXPERIMENTAL | 34 |
| 6.2 SISTEMES DE MESURA EMPRATS | 34 |
| 7 VALIDACIÓ DE L'EINA FLACS EN LA PREDICCIÓ DE L'ABAST VISIBLE DEL NÚVOL | 38 |
| 7.1 PRE-PROCESSAMENT DE LES DADES EXPERIMENTALS | 38 |
| 7.2 CONSTRUCCIÓ DE L'ESCENARI EXPERIMENTAL AMB L'EINA FLACS | 42 |
| 7.3 SIMULACIÓ DE L'ESCENARI | 44 |
| 7.4 COMPARATIVA DADES | 47 |
| 7.4.1 Selecció d'un nou criteri: predicció de l'abast del núvol visible a partir de diferents fraccions de LFL..... | 51 |
| 7.5 ESTUDI DE SENSIBILITAT..... | 53 |
| 8 ESTUDI DE SOSTENIBILITAT DEL PROJECTE | 56 |
| 8.1 DESCRIPCIÓ GENERAL DEL PROJECTE | 56 |
| 8.2 ESTUDI D'ALTERNATIVES..... | 56 |
| 8.3 DESCRIPCIÓ DEL MEDI..... | 56 |
| 8.4 IDENTIFICACIÓ I VALORACIÓ DELS IMPACTES SOBRE EL MEDI..... | 56 |
| 8.4.1 CRITERIS D'AVUACIÓ | 56 |
| 8.4.2 IDENTIFICACIÓ D'IMPACTES..... | 58 |
| 8.4.3 IMPACTES AMBIENTALS POTENCIALS..... | 58 |
| 8.4.4 VALORACIÓ DELS IMPACTES | 60 |
| 8.5 MESURES PREVISTES | 60 |
| 9 COST DEL PROJECTE | 61 |
| 9.1 RECURSOS MATERIALS | 61 |
| 9.2 RECURSOS HUMANS | 61 |
| 9.3 COST TOTAL..... | 61 |
| 10 CONCLUSIONS | 62 |
| 11 REFERÈNCIES BILIOGRÀFIQUES | 63 |
| 12 ANNEXOS..... | 66 |
| 12.1 Fitxes de Seguretat..... | 66 |

| | |
|--|----|
| 12.2 Perfils de dispersió a FLACS als diferents instants de temps..... | 74 |
| 12.2.1 Perfils de temperatura de rosada..... | 74 |
| 12.2.2 Perfils de LFL..... | 77 |

1 GLOSSARI

1.1 DEFINICIONS

BLEVE- Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion. Escenari d'accident en un tanc que emmagatzema líquid inflamable el que la temperatura augmenta considerablement, degut, per exemple a la presència de flames properes. El tanc pateix uns esforços de pressió importants i com a conseqüència un desgast en la seva estructura. A continuació, la totalitat del líquid es troba per sobre del seu límit de sobreescalfament, entra en combustió degut a la flama exterior i s'origina una explosió del dipòsit originant una forta ona de sobrepressió, projecció dels fragments de l'estructura i radiació tèrmica; depenent de si el líquid es combustible o no, serà seguit per una bola de foc.

CFD- Computational Fluid Dynamics. Dinàmica de fluids computacional.

FLACS- FLame ACceleration Simulator. Eina CFD emprada per a la realització d' aquest projecte.

Flash Fire- Un incendi de flamarada és la combustió d'un núvol de gas resultat d'una fuga d'un material inflamable, a l'exterior, el qual al barrejar-se amb aire pot incendiar-se. Si la ignició no succeeix a l' instant d'iniciar-se la fuga, hi ha possibilitat de la formació d'un núvol de vapor inflamable de grans dimensions. El creixement del núvol augmenta la possibilitat de trobar un punt d'ignició a una certa distància de la fuga, si es dona aquesta situació provocarà la flamarada i possiblement una explosió. Després d'incendiar-se, la flama pot retrocedir fins la font primària resultant en un pool fire, jet fire o BLEVE.

Jet Fire- És una flamarada estacionària i allargada que pot esdevenir de la ignició d'una fuga de gas a gran velocitat. Generalment succeeix com el resultat d'una petita esquerda o forat en equips de plantes de processos o tancs d'emmagatzematge, originant un raig a pressió. Si aquest raig troba un punt d'ignició entrarà en combustió, originant el Jet Fire.

LNG- Liquefied Natural Gas. Gas Natural Lìquat.

LPG- Liquefied Petroleum Gas. Gas Lìquat del Petroli.

LFL- Lower Flammable Limit. Límit Inferior d' Inflamabilitat. Habitualment s'expressa en tant per cent en volum. És l'extrem inferior en l'interval de concentracions en el qual una barreja inflamable de gas o vapor en l'aire pot ser encès a una temperatura i pressió donades. Fora d'aquest rang de mesclades de vapor/aire, la barreja no pot incendiar-se (llevat que s'augmentin la pressió la temperatura). El LFL

disminueix en augmentar la temperatura, per tant, una barreja que està per sota del seu LFL, a una temperatura donada pot ser inflamable si s'escalfa prou.

Pool Fire- Incendi que pot esdevenir quan existeix una fuga líquida sobre una superfície horitzontal i troba un punt d'ignició. Presenta una combustió amb flama de difusió turbulenta sobre el toll de combustible, el qual s'evapora degut a l'aportació calorífica del propi incendi.

UFL- Upper Flammable Limit. Límit Superior d'Inflamabilitat. Com en el cas del LFL, s'expressa en % en volum. En aquest cas, és l'extrem superior en l'interval de concentracions. Per sobre d'aquest límit es considera que una mescla de combustible i aire és tant ric en combustible que no és capaç de cremar per la falta d'oxigen.

1.2 NOMENCLATURA

b(x)- Meitat de l'amplada de la secció horitzontal homogènia del núvol de gas, en m.

C₀- Concentració a la font, en g/m³.

C_c- Concentració a la línia central de la dispersió, en Kg/m³.

C_{max}- Concentració màxima, en Kg/m³.

C_{mean}- Concentració mitjana al llarg del temps, en Kg/m³.

C_{x,y,z}- Concentració a les distàncies a desitjar de cada eix, en m.

E(t)- Rati de contaminant alliberat de la font primària, en Kg de contaminat/s.

f_c(t)- Funció per a fuites contínues, definida pels termes inclosos dins del parèntesi.

f_i(t)- Funció per a fuites instantànies, definida pels termes inclosos dins del parèntesi.

g- Acceleració de la gravetat, en m/s².

g₀- Gravetat efectiva en la font, en m/s². $g_0 = \frac{\rho_0 - \rho_a}{\rho_a}$

H- Profunditat d'alliberament característica o profunditat d'intrusió de densitat o núvol, en m.

Q_{*max}- Rati del potencial màxim de flux de contaminant assumible per l'atmosfera, en kg/m²s

R_p- Radi de la font primària, en m.

S_y- Paràmetre d'escalat horitzontal de concentració, en m.

S_z- Paràmetre d'escalat vertical de concentració, en m.

t- Temps, en s.

t_r- Durada de l'alliberament, en s.

u₀- Velocitat del vent mesurada a z-z₀, en m/s.

u_a- Velocitat del vent a l'ambient, en m/s.

u_f- Velocitat frontal del núvol de gas, en m/s.

u_x- Velocitat del vent en l'eix x, en m/s.

V₀- Volum inicial, en m³.

v₀- Rati del flux de volum inicial, en m³/s.

x- Distància en la direcció del vent, en m.

y- Distància perpendicular a la direcció del vent a nivell de terra, en m.

z- Distància vertical en la direcció del vent, en m.

z₀- Alçada de referència en l'especificació de perfil de la velocitat del vent, en m.

α- Constant en la llei del perfil del vent.

ρ- Densitat de la mescla gas-aire, en Kg/m³.

ρ_a- Densitat de l'aire, en Kg/m³.

2 PREFACI

La realització d'aquest projecte neix com a necessitat de validar l'eina FLACS a partir d'una campanya d'experiments de fuites de propà, realitzada conjuntament per la UPC i la Universitat de Sao Paulo (Brasil).

La col·laboració d'ambdues universitats té com objectiu aportar nous coneixements d'interès pels analistes de risc tecnològic a l'hora d'enfrontar-se a problemes de modelització de dispersions amb certa complexitat, com ara aquells que ocorren en escenaris semi-confinats o amb presència de barreres o altres obstacles.

La importància de la realització d'aquest estudi és conseqüència directa de l'increment en l'ús de gasos líquids, i conseqüentment dels perills associats a aquest tipus de substàncies; per tant, de la importància de la seguretat en el transport i emmagatzematge d'aquestes substàncies en qualsevol escenari possible.

Com s'ha comprovat al llarg de la història, la consecució d'accidents en els que han estat implicats (directa o indirectament) gasos líquids és una llista llarga i ben documentada; en els darrers anys els experts en el camp de la seguretat han vist la necessitat d'estudiar amb més profunditat aquestes substàncies i el seu comportament en diferents escenaris.

Malgrat la importància que té actualment aquest camp, les eines de les que es disposen són limitades. Els models matemàtics coneguts tenen limitacions i actualment es comença a treballar amb models físics CFD que estan en procés de validació. Hi ha diverses eines CFD: extensions de l'Ansys, Fluidyn i FLACS. En aquest treball es farà servir FLACS. Amb aquesta eina, s'ha estudiat la dispersió d'un núvol en *Jet*, sense obstacles i sota unes condicions ambientals conegudes.

3 INTRODUCCIÓ

3.1 OBJECTIUS

L'objectiu general del projecte és contribuir a la validació de l'eina de simulació FLACS per a la predicció de fuites inflamables, específicament aquelles en forma de jet. En concret, es pretén validar la metodologia de simulació per obtenir l'abast del núvol visible a partir de l'anàlisi de temperatures i concentracions.

Per assolir aquest objectiu, es realitza una revisió bibliogràfica sobre les substàncies implicades i els models matemàtics que es poden emprar per a estudiar aquest escenari. Conjuntament amb la revisió bibliogràfica es simula un escenari experimental conegut i es realitza una comparativa de l'abast del núvol simulat amb l'abast del núvol real. S'estudia de manera detallada els errors relatius en aquest paràmetre per als tres eixos cartesianes. Finalment, es realitza un estudi de sensibilitat per a comprovar l'efecte de la incertesa en les variables d'interès d'aquesta simulació.

3.2 ABAST

Aquest projecte comprèn un estudi sobre l'abast d'un núvol de propà, tant experimental com simulat. Aquest estudi és precedit per una anàlisi teòrica dels models de dispersió existents per a diferents tipus de gasos i una recopilació d'informació d'uns experiments ja realitzats prèviament. El bloc de simulació comprèn la definició de l'escenari, l'anàlisi de resultats i l'estudi de sensibilitat.

3.3 FINALITAT

Mitjançant aquest projecte, es vol contribuir en la tasca de validació del simulador de fuites inflamables FLACS. La finalitat última és, doncs millorar la tecnologia disponible per a l'anàlisi de risc i facilitar eines per a la predicció de dispersions en Jet.

4 ANTECEDENTS

Des de la revolució industrial, els combustibles han jugat un paper molt important a l'hora d'ajudar a la humanitat per tal que les grans indústries tinguessin una font d'energia per a poder produir. Simultàniament, des de llavors es van anar descobrint diferents funcionalitats i usos secundaris dels derivats d'aquests combustibles o d'ells mateixos en estat natural. Tot i aquesta dependència, no és fins els darrers anys que s'ha pogut veure com el sector dels combustibles gasosos ha patit un increment massiu del seu ús a causa de les exigències d'energia, que cada cop són més elevades. En els darrers 30 anys la demanda s'ha triplicat (Cook, 2013).

Dins d'aquests combustibles gasosos, se'n troben dos de molt importants: el gas natural líquat (LNG) i el gas líquat del petroli (LPG). El LNG és un gas que ha estat processat per ser transportat en forma líquida. És la millor alternativa per aportar reserves d'energia a llocs apartats, on no és rendible portar el gas al mercat directament per gasoducte. El LPG és un gas dissolt al petroli que es pot obtenir evaporant el petroli cru i condensant-lo; s'obté principalment a les torres de destil·lació de les refineries de petroli, o també per mitjà del craqueig d'altres substàncies (hidrocarburs més pesants) obtinguts igualment a la destil·lació. Tant el LNG com el LPG presenten unes característiques molt interessants com a combustibles. La principal diferència entre els dos líquats és que el LNG està basat en gasos lleugers com el metà i l'età i el LPG està format per gasos més pesants com propà i butà. Així, els magatzems i els transports especialitzats en aquests productes han proliferat considerablement.

La demanda de LNG i LPG incrementa cada any per part de les indústries, empreses i el sector de l'energia elèctrica. Per exemple, en el cas dels Estats Units, l'any 2013 el 27% de l'energia emprada era energia a partir del consum de LNG (US E.I.A, 2015). També s'espera un increment significatiu en el consum de LNG per part de la Unió Europea i altres territoris com Xina i la Índia. Degut a tot això les autoritats han incrementat les advertències sobre els riscos associats a la utilització d'aquests combustibles (Cook, 2013).

Tot i la millora en la prevenció de riscos sobre aquests combustibles, segueixen ocorrent accidents durant el segle XXI. Pel cas específic de l'accident més catastròfic, la BLEVE, se sap que la primera substància en aquests tipus d'accidents es LPG i LNG ocupa un vuitè lloc (Hemmatian, 2016).

4.1 PROPIETATS DELS PRODUCTES LNG I LPG

4.1.1 LNG

El gas natural obtingut en les extraccions consisteix en metà, età, propà i altres hidrocarburs pesants, a més de petites quantitats de nitrogen, heli, diòxid de carboni, compostos sulfurosos i aigua.

El líquid es forma quan el gas natural es refreda per sota dels -162 °C a pressió atmosfèrica (Figura 1). El procés de refredament redueix el volum a una 600^a part, fent el transport i l'emmagatzemament més senzill i segur. S'emmagatzema en dipòsits criogènics a pressions pròximes a l'atmosfèrica. La densitat del LNG és aproximadament la meitat comparant-la amb la de l'aigua i en el seu punt d'ebullició, el vapor és 1,5 vegades més pesant que l'aire. Tot i així, quan s'escalfa fins a temperatura ambient, la seva densitat pot arribar a ser la meitat de l'aire. (Villafañe, 2013)

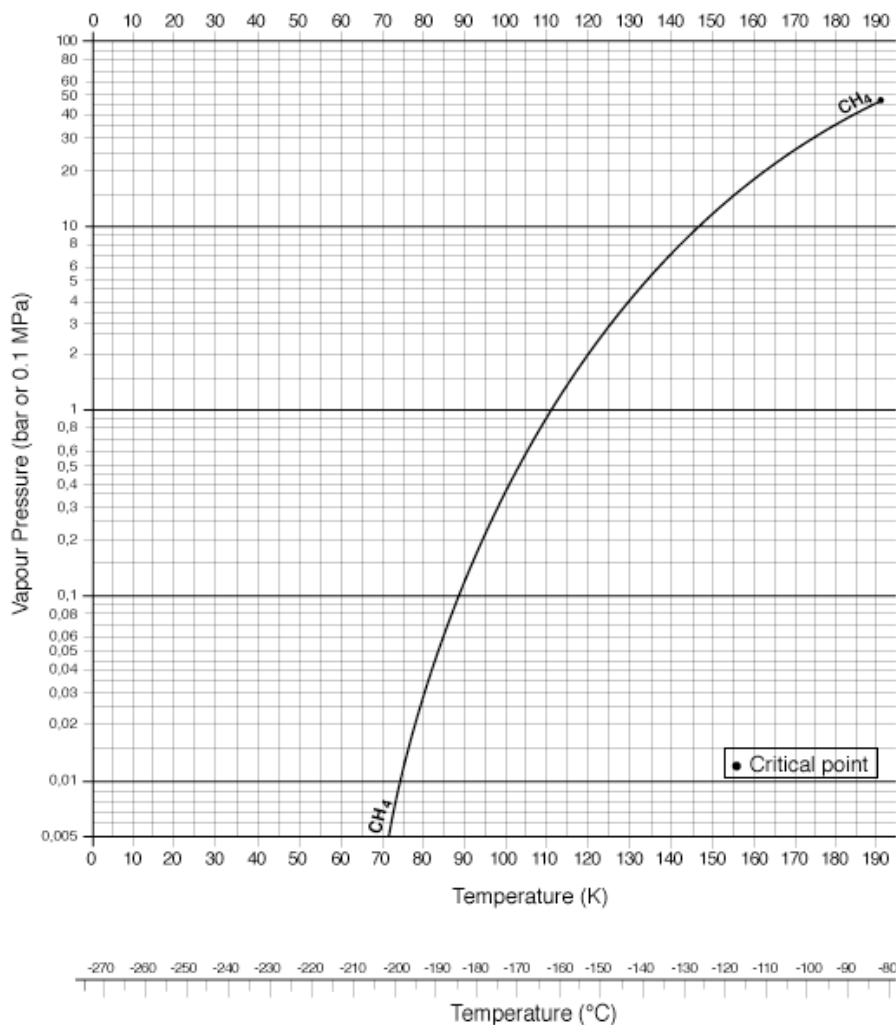


Figura 1- Diagrama Pressió-Temperatura del metà com aproximació del mateix diagrama per a LNG. (Air Liquide, 2013)

El procés de líquüefacció, realitzat a les plantes de líquüefacció que es troben a prop dels jaciments, requereix un pretractament del gas per extreure totes les impureses tals com l'aigua, nitrogen, el diòxid de carboni, l'hidrogen sulfhídric i altres sulfurs. El gas líquuat és transferit a vaixells dissenyats a tal efecte, condicionats per a transport marítim criogènic. Aquests vaixells transporten el LNG fins a les terminals portuàries de destí, en les que el LNG és descarregat mitjançant bombes criogèniques i braços articulats, essent emmagatzemat en dipòsits criogènics sense pressurització, amb una gran capacitat fins a 200.000 m³. Des d'aquests dipòsits, el LNG pot ser transportat en camions cisterna criogènics, o bombejat a alta pressió cap a les instal·lacions de regasificació i transportat, un cop regasificat, mitjançant canonades a les empreses distribuïdores.

Les primeres plantes de líquuació i regasificació de gas natural s'instal·laren als Estats Units amb la finalitat de satisfer puntes de demanda variable. Quan la demanda és baixa, el gas és líquuat i emmagatzemat en grans dipòsits criogènics de gran capacitat. Per altra banda, quan la demanda és elevada, el producte és regasificat i enviat a la xarxa de distribució.

Seguint aquest model de plantes de regasificació, als Estats Units van sorgir les anomenades plantes satèl·lit, amb una funcionalitat similar, però amb menys capacitat i sense capacitat de líquuar. El gas natural és transportat en estat líquid en camions especials des de les plantes de regasificació fins als dipòsits criogènics. El LNG va sortint a la velocitat de la demanda d'aquell moment i uns vaporitzadors el tornen al seu estat gas.

A l'estat espanyol s'ha comprovat que la implantació de plantes satèl·lit resulta extremadament útil per proveir les necessitats de consum de poblacions que es troben a una gran distància de les xarxes de distribució convencionals. (Villafañe, 2013)

Un dels avantatges més interessants que plantegen les plantes satèl·lit de LNG, es troba en aquesta capacitat de permetre la distribució a nuclis urbans allunyats de les metròpolis d'una manera senzilla, simple i a un cost menor que si s'hi hagués d'instal·lar una connexió per gasoducte (Figura 2).



Figura 2- Esquema de distribució de LNG. (Villafaña, 2013))

Com el component principal del LNG és el metà, els límits d'inflamabilitat en l'aire del producte són 5% pel límit inferior (LFL) i 15% pel límit superior (UFL). La seva temperatura d'autoignició és de 537°C i se sap que els punts d'ebullició i fusió es troben a -161°C i -183°C respectivament (IPCS, 2005).

El LNG s'empra principalment pel funcionament de camions de llarga distància, per alimentar motors de grans maquinàries a la indústria i com a combustible en llocs on no arriben les xarxes convencionals d'energia.

4.1.2 GAS LIQUAT DE PETROLI

El gas líquid del petroli és un combustible gas dissolt en el petroli que pot provenir directament de les bosses de gas que es troben als jaciments de petroli o dels condensats que s'obtenen del procés de cracking del petroli cru. Es pot obtenir mitjançant la destil·lació primària del petroli, així com de la resta de processos als quals són sotmesos altres productes de la destil·lació del petroli; com el reformat catalític, el cracking catalític, l'alquilació, etc.

Quan s'extreu el cru de les bosses de petroli, aquest està compost d'una barreja d'hidrocarburs, aigua, gas i sòlids. Quan es tracta aquest cru, es porta a una columna de destil·lació fraccionada, s'obtenen diferents productes. Les fraccions lleugeres, les compostes pel LNG i el LPG marxen per la part més elevada de la columna, on després es separaran entre elles per fraccions de 1 i 2 carbonis pel LNG i fraccions de 3 i 4 Carbonis pel LPG.

Per liquidar-lo, es disminueix la pressió i la temperatura del gas, normalment fins a -40°C (Figura 3). Aquest líquid, està format d'hidrocarburs però la seva composició dependrà del jaciment. Pot predominar-hi el butà, el propà però gairebé sempre contindrà algun altre hidrocarbur en proporcions més petites. Normalment la composició és diferent segons el tipus d'emmagatzematge. Per exemple, en tancs portàtils, la proporció és de l'ordre de 20% propà i 80% butà; per altre banda, tancs d'emmagatzemament fixes i de grans dimensions, la proporció acostuma a ser d'un 90% propà i 10% butà. Degut a que el LPG és incolor i inodor, per a la seva comercialització se li afegeix mercaptà com agent odorant (Villafañe, 2013).

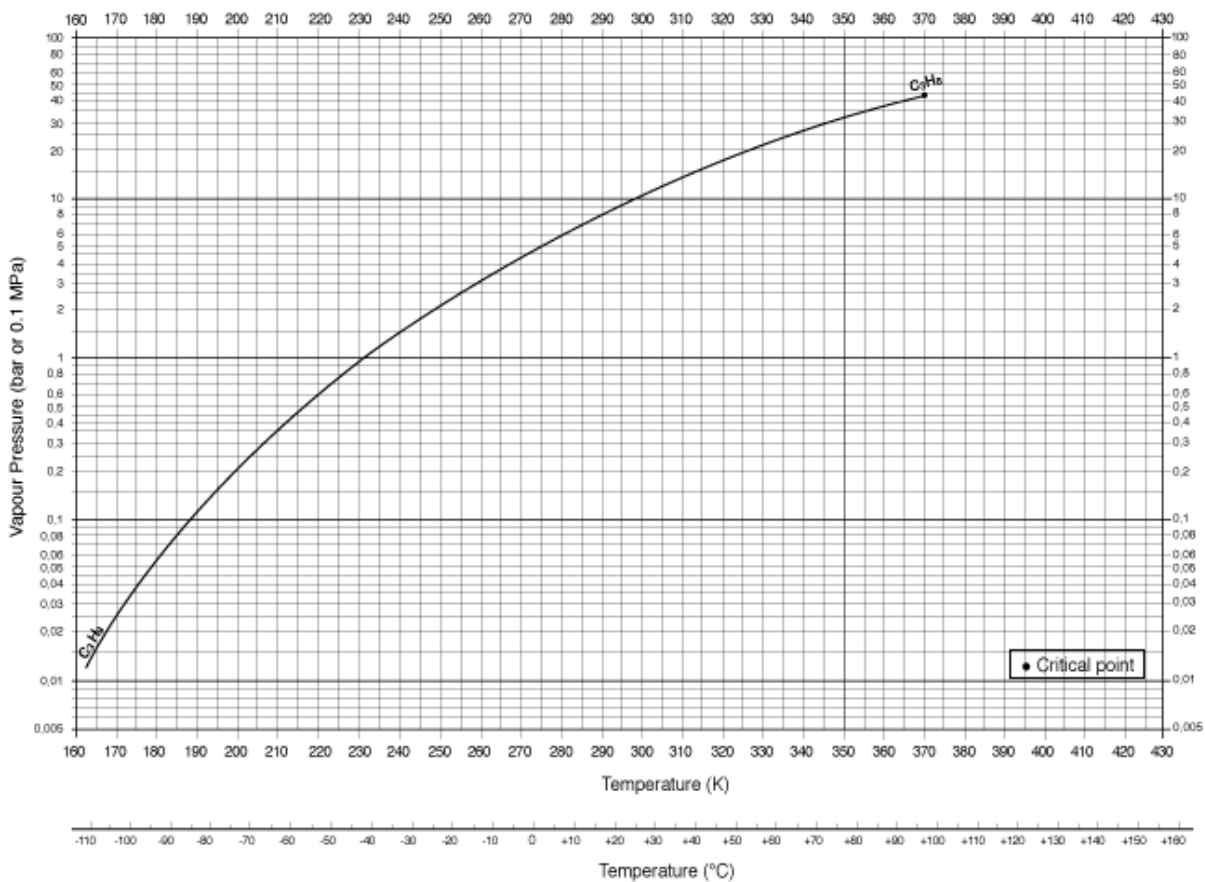


Figura 3-Diagrama P-T del propà com aproximació del mateix diagrama per a LPG. (Air Liquide, 2013)

EL LPG té un gran nombre d'aplicacions (Figura 4). S'utilitza en el transport, en la indústria, en el sector comercial, la cuina domèstica i l'agricultura, entre d'altres. El 45% del LPG emprat és per proveir el consum domèstic d'aquest. Tot i així, el sector amb més creixement és el del transport. Com el LNG, el

seu consum mundial ha augmentat dràsticament els últims anys, obtenint un 45% de creixement durant la dècada dels 90 (Cook, 2013).

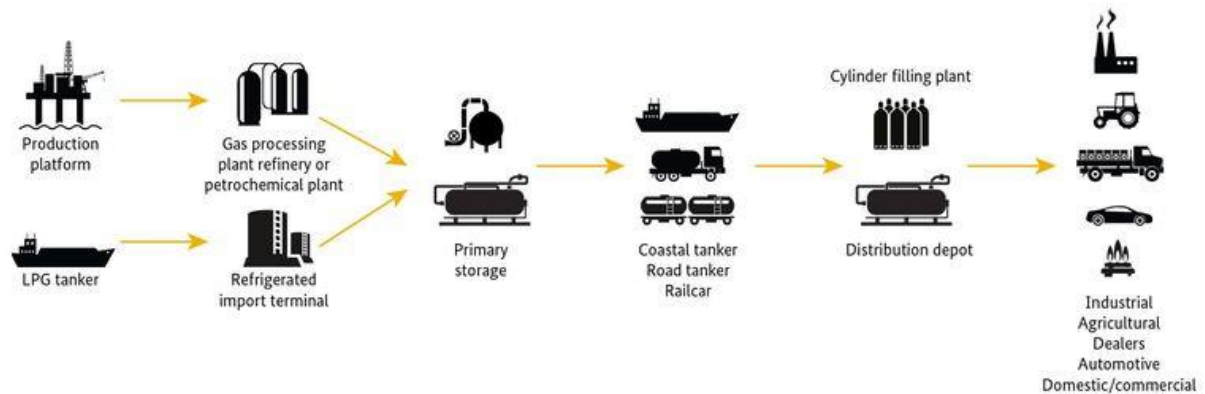


Figura 4- Esquema de distribució de LPG. (Villafañe, 2013)

El LPG es troba en condicions ambientals en estat gasós. Per a poder liquar-lo a pressió atmosfèrica caldrà que la seva temperatura sigui inferior a $-42.2\text{ }^{\circ}\text{C}$. A temperatura ambient, si es vol liquar, s'ha de sotmetre a una pressió alta al voltant de 8 atm. La seva densitat i pressió de vapor varien segons la seva composició. El seu pes molecular és superior al de l'aire, per tant, en el seu estat gasós, es comporta com a gas pesant i tendeix a expandir-se a nivell del terra.

El LPG es converteix en líquid quan se'l sotmet a compressió i refredament simultàniament ($-42,2^{\circ}\text{C}$ pel propà i $0,5^{\circ}\text{C}$ pel butà). Es transforma així 273 L de vapor de propà i 238 L de butà, respectivament, en 1 L de líquid.

Aquest LPG pot ser emmagatzemat sota pressió o refrigerat en funció dels requeriments en el procés de distribució i dels costos implicats. Generalment, fins a 3200 m^3 es pressuritza, de 2400 m^3 fins a 6400 m^3 és semi-pressuritza i per a volums superiors a 6000 m^3 és refrigerat (Brook et al., 2005).

El líquid no és tòxic però pot provocar asfíxia, també pot provocar irritació en la pell i els ulls. És molt inflamable i de combustió ràpida, generant així altes temperatures. El LPG té dos límits de LFL i UFL; 2,1% i 9,5% en volum pel propà i 1,8% i 8,4% en volum pel butà. El punt d'autoignició pel propà és de 450°C i de 265°C pel butà; pel propà els punts d'ebullició i de fusió són -42°C i -189.7°C , pel que fa al butà els seus són -0.5°C i -138°C .

4.2 IMPLICACIONS EN SEGURETAT DEL LNG I LPG

Els perills associats a una fuga de LNG o LPG són diversos i variants depenent del volum, les condicions ambientals i l'entorn on es produeix la fuga. Depenent de si les fuites són contínues o instantànies, el producte pot fugir com a líquid o com a gas. En fuites contínues (forat en un tanc o canonada), si està pressuritzat, la fuga serà en forma de jet; per altra banda, si no ho està, fugirà com un líquid i vessarà cap al terra, formant un toll de producte. Pel que fa a fuites instantànies (trencament catastròfic d'un dipòsit), si el producte està en estat gas fugirà un núvol de gas, tot i així si el producte conté una fracció de líquid es pot formar igualment un toll.

El perill més directe amb una fuga de gas líquid és la dispersió d'aquesta, entenent com a dispersió l'alliberament d'un gas cap a l'atmosfera de manera accidental. Un núvol de gas, si troba un punt d'ignició i les concentracions són les adequades dins del límit d'inflamabilitat, s'inflamarà. A més a més, si la flama aconsegueix arribar fins a una eventual font primària de dispersió (un toll), formarà un incendi de bassal. En cas d'ignició el potencial de ferir a persones es deurà a l'exposició a la radiació tèrmica provinent del núvol inflammat i/o de l'incendi de bassal. Addicionalment, en condicions específiques, el núvol inflammat pot derivar en una explosió si aquest pateix turbulències. La turbulència pot esdevenir per les condicions d'alliberament o per la presència d'obstacles; aquesta turbulència modifica la geometria de la flama causant un increment del radi d'acció, un augment de la velocitat de combustió i consegüentment un increment de la velocitat del front de flama en el sí del núvol, generant un pic de sobrepressió, i per tant, una explosió.

D'altra banda, si una fuga en forma de jet troba un punt d'ignició, pot originar un dard de foc.. El perill associat a aquest tipus d'accident serà també la radiació de les flames provinents d'aquest dard.

En els pitjors dels casos, determinats escenaris poden acabar originant una BLEVE (*Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion*). Aquest cas es pot donar quan un dipòsit de gas líquid es troba immers en flames provocant l'escalfament del combustible que es troba dins del dipòsit. Quan la temperatura del gas líquid augmenta considerablement, el tanc pateix uns esforços de pressió importants i com a conseqüència un desgast en la seva estructura. A continuació, la totalitat del líquid es troba per sobre del seu límit de sobreescalfament, entra en combustió degut a la flama exterior i s'origina el que es coneix com a BLEVE, una explosió del dipòsit originant una forta ona de sobrepressió, projecció dels fragments de l'estructura i radiació tèrmica; depenent de si el líquid es combustible o no, serà seguit per una bola de foc. La descripció segons la CCP és la següent: Una pèrdua sobtada de la contenció d'un gas líquid a pressió elevada i a una temperatura superior al seu punt d'ebullició a pressió atmosfèrica en el moment de l'incident, que resulta en la ràpida expansió de vapor i del líquid condensat (Casal et al., 2014).

4.2.1 EXEMPLES D'ACCIDENTS DE LNG I LPG

La seguretat i la prevenció d'accidents amb aquestes substàncies és molt important, per això a continuació s'expliquen breument accidents documentats de LNG i LPG (CHV•IV International, 2012) de manera cronològica:

Cleveland, Ohio, 1944 (CHV•IV International, 2012)

L'any 1941 la "East Ohio Gas Company" va construir una instal·lació de líquefacció de LNG a Cleveland. La instal·lació va operar sense incidents fins al 1944, quan es va expandir incloent un tanc més gran. A causa de l'escassetat d'acer inoxidable durant la Segona Guerra Mundial el disseny del tanc es va veure compromès. El tanc es va avariar al poc temps d'haver-lo posat en servei, degut a les baixes temperatures a les que va ser sotmès; com es va saber posteriorment, el tanc estava format per un aliatge de níquel que pot patir fissures a temperatures extremadament baixes, com es el cas de l'emmagatzemament de LNG. Aquest es va escapar del tanc, va formar un núvol de vapor que va omplir els carrers i el clavegueram pluvial que envoltava la instal·lació. El gas que hi havia al clavegueram es va inflamar, com a resultat de l'accident van haver-hi 128 morts en les àrees residencials adjacents.

Staten Island, New York, Febrer de 1973 (CHV•IV International, 2012)

El febrer de 1973, un incident industrial relacionat amb la presència de LNG va ocórrer a les instal·lacions de líquefacció de la "Texas Eastern Transmissions Company" a Staten Island. El febrer de 1972, els operadors, sospitant d'una possible fuga, van tancar la instal·lació. Una vegada van buidar el tanc de LNG, van trobar forats al revestiment plàstic. Durant les reparacions del revestiment, aquest va incendiar-se per raons que no van ser aclarides. El foc resultant va augmentar significativament la temperatura del tanc, generant suficient pressió per a desestabilitzar una coberta de formigó de 6 polzades, la qual després va caure sobre els treballadors, matant 40 persones.

Arzew, Algeria, 1977 (CHV•IV International, 2012)

Un treballador d'una planta d'exportació de LNG es va congelar fins la mort quan va ser impregnat amb LNG, que fuitava d'una vàlvula trencada en la part superior d'un tanc estancat al terra. Aproximadament entre 1500 i 2000 m³ de LNG van fuitar, tot i així, el núvol resultant no es va encendre. El cos de la vàlvula que es va trencar estava feta d'alumini. La pràctica actual és la de proporcionar vàlvules de servei en LNG fetes amb acer inoxidable.

Cove Point, Maryland, Octubre de 1979 (CHV•IV International, 2012)

A l'octubre de 1979, es va produir una explosió dins d'una subestació elèctrica al terminal de Cove Point. El LNG es va filtrar del seu dipòsit degut a un error de disseny en el gruix de la paret de la bomba elèctrica, que bombejava del dipòsit de LNG, aquest es va esquerdar i la fuga va entrar a la subestació. Atès que no s'esperava la presència gas natural en l'edifici, no hi havia detectors de gas. Els contactes d'un interruptor van encendre la barreja aire-gas, resultant en una explosió. Aquesta va matar a un treballador de l'edifici i va ferir greument a un segon. Aquest accident va causar 3 milions de dòlars en danys.

San Juan Ixhuatepec, Mèxic, 19 de Novembre de 1984 (HSE, 2015)

L'incident va succeir a una de les plantes d'emmagatzemament i distribució de LPG de l'empresa PEMEX. L'origen de l'accident va ser als voltants de les 5:30 del matí quan es va trencar una canonada de 20 cm de diàmetre que transportava LPG des de 3 refineries diferents cap a la planta d'emmagatzemament compost de 6 tancs esfèrics. El sobreiximent d'un dels dipòsits i la sobrepressió en la línia de retorn, juntament amb la fallida de les vàlvules de seguretat del dipòsit sobreixit, va provocar una fuga de gas durant 10 minuts. Als voltants de les 5:40 el gas fuitat va formar un gran núvol de vapor inflamable d'uns 200 metres de llarg per 150 d'alt; el qual sobre els 100 metres del punt d'alliberament es va inflamar, generant un incendi de grans proporcions afectant habitatges propers. Sobre les 5:45 un petit tanc es va esquerdar, creant una BLEVE i posterior bola de foc d'uns 300 metres de diàmetre, seguit d'explosions en cadena de la resta de tancs durant una hora i mitja. L'accident va provocar al voltant de 600 morts i més de 2000 ferits.

Bontang, Indonèsia, 1993 (CHV•IV International, 2012)

Un incident important es va produir el 14 d'abril de 1983 a Bontang, Indonèsia. La principal columna de líquefacció es va foradar degut a la sobrepressió causada per una brida cega en una línia del cremador durant l'arrencada d'aquest. Tots els sistemes de protecció de pressió van ser connectats a aquesta línia. L'intercanviador de pressions va experimentar tres vegades la seva pressió de disseny abans de trencar-se. Les seccions de la bobina es van projectar a uns 50 metres de distància. La metralla de la columna va matar a tres treballadors. El foc que va seguir va ser extingit en uns 30 minuts. Aquest incident es va produir durant el buidat i la purga de l'intercanviador, on es fa circular gas natural calent abans d'introduir qualsevol LNG al sistema, per la qual cosa el LNG no estava involucrat.

Tivissa, Catalunya, Espanya, 22 de Juny de 2002 (Planat-Cuchi et al., 2004)

Un camió cisterna de LNG es va bolcar i incendiar a la carretera C-44 prop de la població de Tivissa, i posteriorment, (aproximadament 20 minuts més tard) va patir un incendi significatiu de LNG. Va ser el primer incident a Espanya reportat d'aquest tipus que involucrés LNG. No obstant això, el disseny del remolc era molt diferent a l'emprat als Estats Units. Es tractava simplement d'un recipient a pressió aïllat externament amb aïllament de poliuretà sense revestiment, mentre que als Estats Units, els remolcs criogènics a pressió són de doble paret amb camisa de buit. Quan el remolc va bolcar, l'aïllament es va raspar amb facilitat per fora del recipient a pressió i es va exposar directament al foc. Degut a la naturalesa greu de l'accident, el conductor va morir i una dona que es trobava a 200 metres de distància del camió va patir cremades de segon grau.

Reno, Nevada, 14 de Setembre de 2005 (CHV•IV International, 2012)

Un conductor d'un camió a remolc de LNG es va aturar en una parada de camions a prop de Reno i es va adonar que hi havia LNG que s'escapava d'una vàlvula. Va informar als serveis d'emergència locals. Poc després de l'arribada dels serveis d'emergència, el vapor de LNG es va inflamar. L'equip d'emergència que es trobava in situ va decidir tancar la carretera interestatal i evacuar les persones de l'àrea residencial. Quan el foc es va apagar, es va cancel·lar l'evacuació. Es va constatar que el remolc estava dissenyat segons les especificacions de LNG i no hi havia hagut pèrdua de buit en el remolc en el sistema de doble paret.

Rotterdam, 8 de Setembre de 2011 (CHV•IV International, 2012)

Durant els treballs de manteniment en un dels molls del terminal d'exportació de LNG, una petita quantitat de gas natural va ser alliberada. Això va causar un núvol blanc visible al port. La condensació de la humitat de l'aire després d'entrar en contacte amb el gas fred va causar aquest núvol visible. En coordinació amb les autoritats del port, es van aturar els moviments dels vaixells durant un temps prudencial a l'entorn immediat del moll. L'alliberament del gas es va aturar i es va reprendre a poc a poc el moviment de vaixells.

Zarzalico, Espanya, 20 d' Octubre de 2011 (Planas et al., 2014)

Un camió cisterna de LNG va col·lisionar amb la part posterior d'un camió que estava estacionat degut a uns problemes amb la càrrega que transportava. Degut al xoc, el camió cisterna va traspasar els guarda-rails quedant suspès per les rodes del darrera a la carretera. Segons els testimonis, el tanc es va incendiar just quan el camió cisterna de LNG es va aturar completament. Els equips d'emergència

van decidir crear un radi de seguretat de 600 m i bloquejar totes les vies en aquest radi, evacuant a veïns i testimonis de l'accident. Al cap d'uns minuts, el tanc va explotar. Es van poder observar tres tipus d'efectes en l'accident: sobrepressió a causa de l'explosió, projecció de fragments del tanc i la radiació degut a la bola de foc. Les conseqüències d'aquests efectes es van poder constatar fins a 200m de radi de l'accident. No van haver-hi morts ni ferits durant l'explosió, a part del conductor que va morir degut a la col·lisió.

Japó 16 de Novembre de 2013 (KHK,2013)

Quan un contractista estava cavant en una carretera per afegir noves canonades de gas (tubs de polietilè) a un metre de profunditat sota terra va danyar les canonades de subministrament ja existents amb una pala mecànica. El gas que transportaven aquestes canonades, més tard es va saber que era propà. El contractista va entrar al forat per aturar a fuita de gas desconeixent la seva naturalesa. A causa d'això va morir de deficiència d'oxigen més tard a un hospital.

Com s'ha pogut observar en el recull d'accidents estudiats durant gran part del s. XX la principal causa dels accidents eren deguts a errors mecànics en la estructura, el material emprat degut a la poca informació disponible de la naturalesa dels productes emmagatzemats i errors de disseny; amb especial menció a l'accident ocorregut a Mèxic el 1984, un dels accidents amb més mortalitats registrades. Durant el s.XXI s'observa com la gran problemàtica és l'error humà durant el transport del combustible o el manteniment de les estructures de transport, tot i així encara es pateixen errors en el disseny de les estructures contenidores dels combustibles.

4.2.2 ABAST VISIBLE D'UN NÚVOL DE GAS

Els núvols de gas es poden fer visibles degut a la condensació de la humitat ambiental, aquesta característica es important ja que conèixer l'abast visible del núvol i la seva relació amb les característiques d'inflamabilitat dels gasos és important de cara a la prevenció de riscos i la seguretat.

La condensació del núvol de gas es dona quan la temperatura de l'aire arriba al punt de rosada, fent-lo visible (Villafañe, 2013). El punt de rosada és funció de la quantitat de vapor d'aigua present a l'aire, o humitat absoluta. La seva expressió és:

$$T_{rosada} = \sqrt[8]{\frac{H_R}{100}} \cdot [112 + (0.9 \cdot T)] + (0.1 \cdot T) - 112 \quad [1]$$

On:

T_{rosada} és la temperatura en el punt de rosada, en °C.

T és la temperatura ambient, en °C.

H_R és la humitat relativa en %.

La humitat relativa és la relació percentual entre la pressió parcial del vapor d'aigua en l'aire i la pressió del vapor d'aigua a la mateixa temperatura. Representa la relació entre la quantitat d'humitat present a l'atmosfera a una determinada temperatura i la màxima quantitat que pot contenir aquesta atmosfera sense saturar. Les temperatures seques i humides es poden mesurar amb equips convencionals obtenint la humitat relativa d'aquests valors, o també es pot obtenir amb sensors donant els valors directament. (Villafañe, 2013)

Blackmore e tal. (1982) , a partir d'estudis experimentals de fuites de gasos líquids, va estimar que l'abast del núvol on es detecta la concentració de LFL coincideix amb el perímetre visible del núvol quan la humitat relativa de l'atmosfera és del 50%. Amb aquest punt de partida, Villafañe (2013) va estudiar la relació entre la regió inflamable d'un núvol de LNG, el seu LFL, i el límit visible del núvol. Va proposar el factor de seguretat de dispersió (*DSF*), expressat així:

$$DSF = \frac{X_{LFL}}{X_{vis}} \quad [2]$$

On:

X_{LFL} és la longitud del núvol inflamable corresponent a la corba de nivell del LFL.

X_{vis} és la longitud del núvol visible.

Donada l'expressió anterior, valors de *DSF* menors a la unitat indicaran que la regió inflamable està localitzada dins del perímetre visible del núvol. Per altre banda, si *DSF* es superior a la unitat, la regió inflamable es troba més enllà del núvol visible.

Vilafañe (2013) va estimar la temperatura del núvol a diferents distàncies, per tal de determinar el contorn visible del núvol en funció de la temperatura de rosada.

5 MODELITZACIÓ S MATEMÀTICA DE LA DISPERSIÓ DE GASOS

Els models de dispersió es classifiquen normalment com a models que tracten els núvols formats per substàncies amb densitats més altes que l'aire o els models que tracten núvols formats per substàncies amb densitats iguals o menors que l'aire. A més, aquests models es subdivideixen en els models que tracten núvols formats a partir d'una àrea o volum com a font primària i models que tracten els núvols formats a partir d'un jet. Hi ha diferents enfocaments per a modelar la dispersió de núvols en funció de la naturalesa de les equacions desenvolupades: empírics, integrals i físics (Miralles, 2015).

5.1 DISPERSIÓ ATMOSFÈRICA

Per entendre el fenomen de la dispersió atmosfèrica prèviament s'han d'estudiar els conceptes de gas neutre i gas pesant. Es considera gas lleuger o neutre aquell gas que la seva densitat és menor o igual a la densitat del aire i, per tant, la seva dispersió és a alçades superiors a la de la font d'alliberament. Pel que fa al gas pesant, es aquell gas amb una densitat superior a la de l'aire, llavors la seva dispersió tendeix a succeir a alçades inferiors a la font d'alliberament arribant a nivell del terra si la font està a poca alçada o la distància és suficientment gran.

Les dispersions de gasos es veuen afectades per les condicions atmosfèriques del moment. La velocitat del vent és un factor molt important, ja que determina, juntament amb d'altres paràmetres, el tipus d'estabilitat atmosfèrica. Aquesta velocitat varia segons l'alçada, en general es pren com a referència la velocitat del vent a 10 m d'alçada.

L'estabilitat atmosfèrica és una mesura del grau de turbulència atmosfèrica. L'atmosfera pot ser estable (gradient subadiabàtic), neutra (gradient adiabàtic) o inestable (gradient superadiabàtic); la capacitat de discernir en quina estabilitat es troba l'escenari depèn directament del gradient tèrmic atmosfèric comparant-lo amb el gradient tèrmic adiabàtic, és a dir, el gradient tèrmic teòric que experimenta un gas si se suposa que el procés és adiabàtic.. El gradient tèrmic és la variació de temperatura que experimenten les masses d'aire en moviment vertical, es veu influenciat per l'humitat a l'ambient i es mesura en °C/m. L'estabilitat atmosfèrica es classifica en sis tipus segons les categories de Pasquill-Gifford de A a F (Taula 1), que es calculen en funció de les variables meteorològiques: temperatura (Taula 2), direcció (Taula 3) i velocitat del vent i radiació solar (Taula 4) (EQ, 2016).

Taula 1-Tipus d'estabilitat segons Pasquill-Gifford

| Classe D'estabilitat | Definició |
|----------------------|------------------------|
| A | Molt Inestable |
| B | Inestable |
| C | Lleugerament Inestable |
| D | Neutra |
| E | Lleugerament estable |
| F | Estable |

Taula 2- Determinació de la classe d'estabilitat segons gradient tèrmic vertical

| Classe D'estabilitat | Gradient tèrmic vertical (°C/100m) |
|----------------------|------------------------------------|
| A | Menys de -1,9 |
| B | De -1,9 a -1,7 |
| C | De -1,7 a -1,5 |
| D | De -1,5 a -0,5 |
| E | De -0,5 a +1,5 |
| F | Més de +1,5 |

Taula 3- Determinació de la classe d'estabilitat segons la fluctuació en la direcció del vent

| Classe D'estabilitat | Variació horitzontal de la direcció del vent |
|----------------------|--|
| A | 25.0 |
| B | 20.0 |
| C | 15.0 |
| D | 10.0 |
| E | 5.0 |
| F | 2.5 |

Taula 4- Determinació de la classe d'estabilitat segons radiació solar i velocitat del vent

| Velocitat del vent a la superfície (m/s) | Dia Nivell de radiació solar | | | Nit Cobertura del cel | |
|--|---------------------------------|---------|------|--------------------------|---------------|
| | Elevat | Moderat | Baix | Més del 50% | Menys del 50% |
| <2 | A | A-B | B | E | F |
| 2-3 | A-B | B | C | E | F |
| 3-5 | B | B-C | C | D | E |
| 5-6 | C | C-D | D | D | D |
| >6 | C | D | D | D | D |

5.2 MODELS MATEMÀTICS EXISTENTS

5.2.1 MODELS EMPÍRICS

Els models empírics estan basats en la seva totalitat en informació recollida experimentalment. Aquests models proveeixen resultats ràpids i són fàcils d'implementar, tot i així, no són tant exhaustius com els models integrals o els models físics. Els models empírics més coneguts són el model de Britter & McQuaid, el model Gaussià i el model de Chen i Rodi.

MODEL DE BRITTER & MCQUAID

El model proposat per Britter & McQuaid (1988) consisteix en correlacions empíriques entre grups independents de variables que descriuen la dispersió de núvols pesants, tant en alliberaments instantanis (tipus jet) com continus sense jet. El model presenta una sèrie de gràfics que representen les diferents concentracions del núvol com a una funció de la distància al punt inicial on comença la fuga. Aquests gràfics van ser desenvolupats a partir de dades extretes experimentalment de proves a camp obert, laboratoris i túnels de vent. Un dels problemes principals d'aquest model és la seva simplicitat, els gràfics emprats no consideren en cap situació alliberaments amb tipus de terrenys amb certa complexitat, només a terrenys plans i sense obstruccions.

El model és generalment acceptat i és considerat una referència fonamental per a la dispersió de gasos pesants, és especialment útil per a càlculs amb un objectiu indicatiu com poden ser estudis preliminars (Miralles, 2015).

MODEL GAUSSIÀ

Aquest model es recomana emprar-lo per avaluar dispersions passives (és a dir neutres) de núvols sobre terreny pla i uniforme, d'alliberaments instantanis o continus sense la presència de jets i té el seu origen en les equacions de Pasquill-Gifford. En aquest sentit, cal ressaltar el Model Gaussià de Plomall (GPM) (TNO, 2005). Es compon d'un conjunt de fórmules desenvolupades per estimar la concentració en funció de la velocitat d'alliberament, velocitat del vent, la massa alliberada i els paràmetres de dispersió (experimentals). Es basa en el fet que, suposant la turbulència i la velocitat del vent homogenis, la distribució de concentracions d'una extensió del núvol en els tres eixos principals pren una forma de distribució gaussiana. El model de GPM és àmpliament emprat per avaluar la dispersió passiva i és aplicable per a la dispersió sobre terrenys plans. No obstant això, no és recomanable utilitzar aquest model per dispersions que superin les 3 hores, ja que no és capaç de tenir en compte els canvis en les condicions atmosfèriques que poden ocórrer al llarg d'un dia. (Miralles, 2015)

MODEL DE CHEN & RODI

El model proposat per Chen i Rodi (1980) avalua la dispersió dels núvols formats per jets verticals si la substància alliberada és més densa que l'aire o per jets en qualsevol direcció si la substància és menys densa que l'aire. El model prediu una atmosfera en repòs uniforme (sense vent) i la velocitat d'alliberament ha de ser menor d'un terç de la velocitat del so a pressió ambiental (TNO, 2005).

Aquest model també es basa en dades empíriques; ja que està comprès per equacions empíriques que estimen la concentració i la velocitat d'alliberament del centre del jet com a funció del punt de distància d'alliberament, i a partir d'aquestes equacions les distàncies màximes i la massa del núvol poden deduir-se. Aquest model és fàcil d'implementar però, és aplicable només en escenaris molt específics. (Miralles, 2015)

5.2.2 MODELS INTEGRALS

Els models integrals són els models que utilitzen equacions diferencials o integrals per modelitzar els principis físics que descriuen les variables d'interès d'una manera bastant senzilla.

En aquesta secció els models més rellevants són Havens & Spicer (1985) i DEGADIS (Dense Gas Dispersion Model).

MODEL DE GASOS DE DISPERSIÓ PESANTS (DEGADIS)

El model de dispersió de gasos pesants (DEGADIS), va ser desenvolupat per la "U.S. Coast Guard" i "Gas Research Institute" (Havens & Spicer, 1985). Aquest model es una adaptació del model "Shell HEGADAS".

Aquest model explica que si la font primària allibera un flux de gas que excedeix el percentatge màxim assumible per l'atmosfera, es crea una capa de gas dens a nivell de terra just sobre la font primària, coneguda com font secundària. En les proximitats d'aquesta font secundària, domina un règim de flotabilitat. Si la font primària no excedeix els límits de concentracions de gas assumibles per l'atmosfera, la fuga és absorbida per aquesta mateixa i dispersada en la direcció del vent.

En ambdós casos, la dispersió ocorreguda en la direcció del vent assumeix una llei exponencial de distribució de la concentració en direcció vertical amb la inclusió d'un model Gaussià en l'eix horitzontal amb una llei exponencial específica pel perfil del vent.

FORMACIÓ DE LA CAPA DE LA FONT SECUNDÀRIA

La formació d'una capa o núvol a nivell de terra és degut a la fuga instantània d'un cert volum d'un gas més dens que l'aire (Figura 5). Aquest núvol o capa es dispersa de lateralment fins que la seva

concentració disminueix fins a nivells de concentració assumibles per l'atmosfera, tot i així es considera que el centre d'aquest núvol manté en estat estacionari la seva concentració durant el temps que duri l'alliberament de volum. (TNO, 2005)

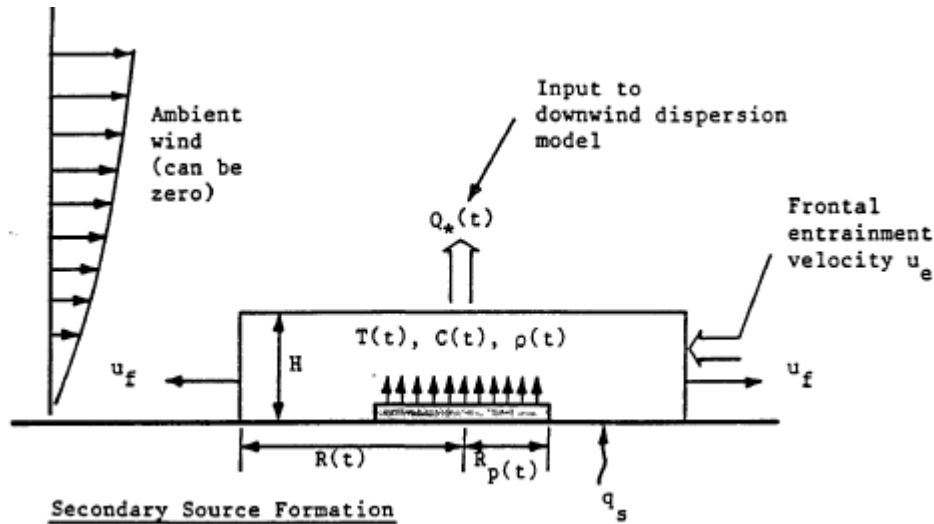


Figura 5-Representació de la formació de la capa de la Font Secundària.

DISPERSIÓ DE LA CAPA DE LA FONT SECUNDÀRIA A NIVELL DE TERRA

El flux emès del núvol en la direcció del vent és igual al flux del potencial assumible per l'atmosfera, Q_{*max} . Per a $E(t)/\pi R_p^2(t) > Q_{*max}$, el núvol es forma per sobre de la font primària. La velocitat de dispersió frontal del núvol, es modelitza segons les figures 5 i 6:

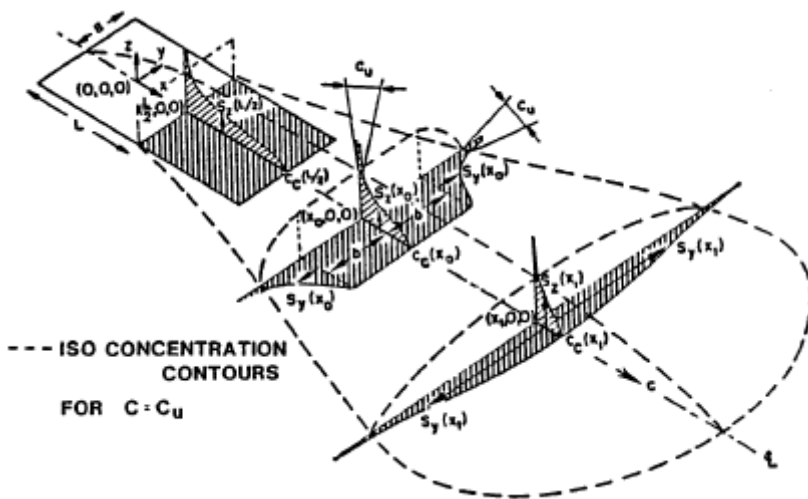


Figura 6-Esquemàtic dels càlculs en DEGADIS.

Aquest model és molt útil quan s'inicia l'estudi des del nivell del terra i es va dispersant el núvol sobre aquest. Tot i així, normalment les fuites no acostumen a formar-se d'aquesta manera, per tant s'haurà d'estudiar amb un altre model els instants previs a que es formi la capa a nivell de terra. (TNO, 2005)

5.2.3 MODELS FÍSICS

Els aspectes físics de qualsevol flux es regeixen per tres principis: la massa es conserva, es compleix la segona llei de Newton i l'energia es conserva. En els models físics, aquests principis s'expressen en les equacions integrals o equacions diferencials que són la forma més comuna de les equacions de Navier-Stokes per a fluxos viscosos i les equacions d' Euler per a fluxos no viscosos. Aquests models físics són els implementats en eines computacionals de dinàmica de fluids (CFD) i es refereixen generalment com a models CFD. Aquestes eines transformen les equacions que governen els principis físics fonamentals de la mecànica de fluids en formes algebraiques discretitzades, que es resolen per trobar els valors del flux en el temps i espai. Els valors que s'obtenen són característics del núvol, com ara la concentració. Són models integrats que permeten la modelització de núvols densos o passius formats per qualsevol tipus de font primària. A més, els models físics permeten tenir en compte les complexitats dels escenaris, com ara barreres o espais parcialment confinats. A més a més permeten estudiar tant gasos densos com lleugers. Modelitzar en CFD dona una idea dels patrons de flux que són difícils, costosos o impossibles d'estudiar emprant tècniques experimentals tradicionals. (Miralles, 2015)

Tot i els avantatges ja vistos, les simulacions en CFD no són 100% fiables. És possible que les dades introduïdes contemplin massa aproximacions, o que els models matemàtics emprats no siguin del tot adequats. La fiabilitat dels resultats obtinguts depèn de la precisió amb la que es modelitzi l'escenari.

Actualment existeixen una varietat de programaris CFD com CFX (Ansys, 2016), FLUENT (Ansys 2016), PANACHE (Fluydin, 2010) o FLACS (Gexcon AS, 2012). En aquest cas l'estudi s'ha realitzat amb FLACS ja que és del que se'n disposa llicència.

5.3 FLACS (Flame Acceleration Simulator)

En aquesta secció s'inclou una descripció detallada de l'eina FLACS amb les seves funcionalitats (Miralles, 2015).

5.3.1 MODELS, RESOLUCIÓ NUMÈRICA I VARIABLES CLAU

FLACS resol bàsicament les equacions que governen la dinàmica dels fluids i empra un model de volums finits en un mallat cartesià 3D, on geometries complexes es representen segons la seva porositat.

Primerament s'explora la geometria, les equacions de govern i la turbulència; després, es detallen les condicions de contorn i els esquemes numèrics implementats en FLACS; finalment es resumeixen les variables d'entrada i sortida necessaris per avaluar la dispersió del núvol.

REPRESENTACIÓ DE LA GEOMETRIA I EL MALLAT

Per tal de resoldre la física del camp de flux, cal dividir el domini en petits subdominis, això implica la generació d'una malla de cel·les també definides com volums de control. La geometria i la mida d'aquestes cel·les juntament amb el mètode numèric utilitzat per resoldre les equacions són aspectes crucials en l'avaluació del temps de resolució i la precisió d'una simulació.

En el software CFD, la malla es refina en les regions d'interès com al voltant dels principals obstacles que poden afectar la dispersió del núvol i les fonts d'emissió (és realitza un micro mallat), es va augmentant el volum de control a partir del micro mallat cap a l'exterior fins realitzar un macro mallat de la resta de l'escenari. La malla està composta per cel·les cúbiques i les seves interseccions són línies horitzontals i verticals. La resolució del mallat pot ajustar-se a qualsevol eix cartesià. Tot i això, no és possible construir un mallat amb línies inclinades o corbades. (Figura 7)

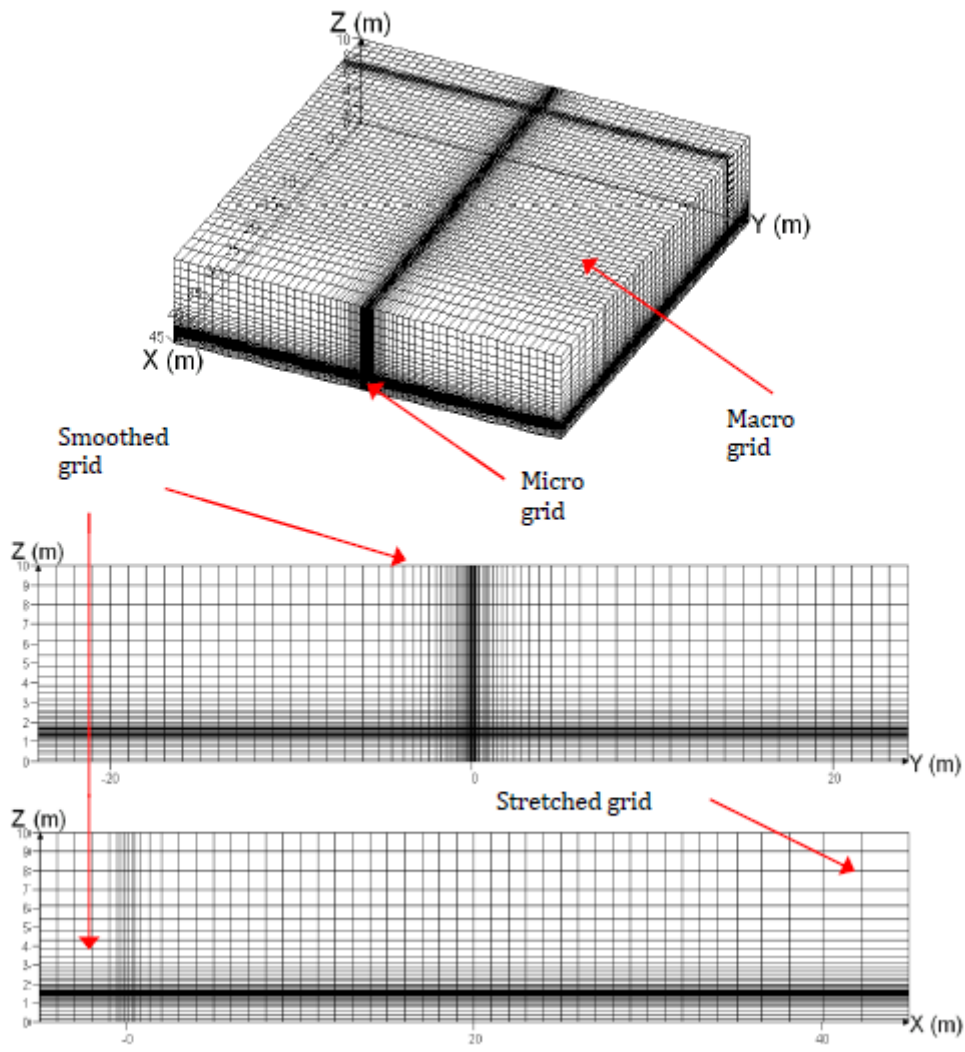


Figura 7- Representació d'un mallat. (Miralles, 2015)

Finalment, les bones pràctiques del mallat en FLACS recomanen un procediment de quatre etapes per a l'anàlisi de dispersió: cobrir la totalitat del domini computacional amb un mallat uniforme, suavitzar la transició entre el micro i macro mallat i estirar el mallat fora de la regió principal cap als límits. A més a més, les directrius suggereixen que un punt de partida per a les dimensions de les cel·les pot ser de 1 a 1,5 m si les estructures del mallat, que estan formades per la totalitat de l'escenari amb tots els accidents que inclou, són més grans que 8,5 m i igual a 0,5 m per a estructures inferiors. D'altra banda, per a terrenys amb pendent, el mallat s'ha d'ajustar en un rang entre 0,1 i 0,5 m en la direcció vertical. (Miralles, 2015)

EQUACIONS PRINCIPALS

FLACS utilitza equacions de conservació de la massa, energia i moment; les equacions mínimament necessàries per a poder realitzar càlculs amb precisió. Per a la conservació de massa utilitza una variació en la que aplica els conceptes de porositat per a tal de simplificar els càlculs del programa, on

es representa que el flux net de massa ha de ser igual en temps al rati de disminució de massa dins del volum de control. Pel que fa a l'energia es basa en la primera llei de la termodinàmica, estableix que les quantitats d'energia intercanviada (expressada en termes d'entalpia), és igual al flux de calor afegit o eliminat, més la calor provinent del treball fet, més la quantitat neta de calor afegit. Finalment, la conservació de moment depèn de diferents factors; com el tensor tensió, l'acceleració gravitacional en la direcció de les x , la pressió, la resistència a causa de les obstruccions físiques i una última resistència a les friccions amb murs i parets.

MODEL TURBULENT

En molts escenaris pràctics, com la dispersió sobre terrenys complexos, hi ha turbulència present al flux. Aquesta turbulència es deu a forces de cisallament dins del flux, causat per les fluctuacions en la velocitat. Les visualitzacions de fluxos turbulents mostren la presència de remolins turbulents (estructures de flux rotacional) de diferents escales de longitud i velocitat. La longitud i la velocitat dels remolins més grans són del mateix ordre de magnitud que la longitud i la velocitat mitjana del flux, la qual cosa indica que aquests remolins estan dominats per efectes d'inèrcia; aquests tendeixen a crear noves inestabilitats en el flux i per tant produir petits remolins. L'energia es transfereix des dels remolins més grans cap els més petits, per tant, dominats per efectes viscosos.

En els fluxos atmosfèrics, la turbulència és el mecanisme dominant en la barreja i dilució del producte alliberat i pot donar lloc a fluctuacions en les propietats dels fluxos més importants, com ara: la densitat, la temperatura i la concentració (Sklavounos & Rigas, 2004).

FLACS incorpora el model de turbulència RANS (*Reynolds-averaged Navier-Stokes equations*). En aquest model les propietats físiques dels fluxos es calculen amb les seves mitjanes, això facilita una aproximació més ràpida que amb altres models més complexos. Juntament amb RANS, es necessita afegir un sub-model, com per exemple el k - ϵ que avalua la turbulència segons l'energia cinètica d'aquesta (k) i el seu rati de dissipació (ϵ).

CONDICIONS DE CONTORN

Les condicions inicials del flux i de contorn dicten la solució obtinguda a partir de les equacions principals; en FLACS l'usuari ha d'especificar les condicions de contorn per als límits exteriors del domini de la simulació. El manual d'usuari de FLACS recomana considerar el vent com a condició de contorn per a la dispersió. Els models amb el vent com a condició de contorn en un espai exterior, els perfils de velocitat i la turbulència del vent de l'escenari, han d'estar definits a les condicions de contorn. Aquests perfils són calculats per FLACS procedents de la velocitat i direcció del vent a una alçada específica i dels paràmetres de turbulència marcats.

VARIABLES DE FLACS

Les variables d'entrada a les simulacions CFD de dispersió fan referència a la geometria, el mallat, l'escenari i els paràmetres de simulació. En FLACS, la geometria es pot definir directament en el programa o pot importar-se d'un sistema CAD; el mallat és cartesià; els paràmetres d'escenari cobreixen tant les condicions inicials de la simulació com les condicions de contorn del domini i finalment hi ha els paràmetres de simulació, que caracteritzen el modelatge. Els paràmetres de simulació s'utilitzen per definir els aspectes del model computacional; definiran apartats com el temps de simulació, les variables de sortida d'interès o les constants inicials emprades en el model de turbulència. La Taula 5 mostra les variables que es troben dins l'escenari.

Taula 5- Condicions de l'escenari

| Variables | Unitats | Descripció |
|---|--------------------|--|
| Temperatura ambient | °C | Temperatura ambient a l'escenari |
| Pressió Ambiental | bar | Pressió ambiental a l'escenari |
| Rugositat del sòl | m | Rugositat del sòl a l'escenari |
| Velocitat del vent a l'alçada de referència | m·s ⁻¹ | Velocitat del vent a una alçada específica |
| Alçada de referència | m | Alçada relativa al sòl, on la velocitat del vent al terreny és igual a la velocitat del vent |
| Direcció del vent | ° | Direcció predominant del vent |
| Tipus d'estabilitat Pasquill | - | Classe d'Estabilitat Atmosfèrica |
| Humitat Relativa | % | Humitat relativa de l'aire |
| Durada Alliberament | s | Durada de la fuga |
| Estimació de l'àrea expandida de la fuga | m ² | Estimació de l'àrea de la fuga en cas de Jet; aquesta es l'àrea esperada del Jet després d'expandir-se a pressió ambiental, assumint gas ideal |
| Flux màssic | kg·s ⁻¹ | Cabal de la fuga |
| Temperatura de sortida | °C | Flux de temperatura en el moment d'alliberament |
| Pressió de sortida | bar | Flux de pressió en el moment d'alliberament |
| Instant inicial | s | Instant en el que s'inicia la fuga |
| Direcció de la fuga | - | Direcció del Jet |
| Alçada de la fuga | m | Alçada del punt d'alliberament |
| Fraccions de volum | - | Fraccions de volum dels productes que constitueixen la barreja alliberada |
| Relacions Equivalents | - | Comparativa de les concentracions de productes |

en vers la concentració estequiomètrica

La Taula 6 recull els paràmetres de la simulació amb una petita descripció de cadascun d'ells. Aquests paràmetres poden influenciar directament en els resultats obtinguts en les simulacions.

Taula 6-Paràmetres de la simulació

| Paràmetres | Unitats | Descripció |
|-----------------------------|-------------------------|--|
| Monitor Points | - | Ubicacions definides per l'usuari en l'escenari de la simulació, on es supervisen una o més variables durant la simulació |
| Valors de sortida | - | Aquesta opció s'utilitza per triar les variables de sortida d'interès i per tant definir les variables que tenen els seus valors en funció del temps o l'espai durant la simulació |
| Temps màxim de simulació | s | Si la simulació arriba a aquest instant de temps s'aturarà |
| CFLC | - | Número de Courant-Friedrich-Levy basat en la velocitat del so, s'utilitza per definir els passos de temps de la simulació de dispersió |
| CFLV | - | Número de Courant-Friedrich-Levy basat en la velocitat del so, s'utilitza per definir els passos de temps de la simulació d'explosió |
| Temps d'acumulació del vent | s | Temps estipulat per a la velocitat de contorn a pujar de zero a la velocitat del vent. Un valor més gran que zero dona un inici suau de la simulació |
| Velocitat característica | m·s ⁻¹ | Valor inicial de la velocitat utilitzada per trobar valors inicials dels camps de turbulència |
| MODD | unitats·s ⁻¹ | Freqüència d'emmagatzematge de dades. Es determina la freqüència en la que s'emmagatzemen les dades en temps escalar a l'arxiu de resultats |

| | | |
|---------------|---|---|
| DTPLOT | s | Interval de temps per als valors de sortida |
|---------------|---|---|

Hi ha una gran quantitat de variables de sortida per escollir a FLACS; tot i això, el programa no enregistra totes les possibles variables ja que faria massa llarga la simulació. Per això, és necessari definir les variables d'interès abans de començar la simulació. Els resultats obtinguts de la simulació en gran part són gràfics 2D i animacions 3D, a més a més d'obtenir un registre de text amb tots els valors de la simulació de les variables escollides. La Taula 7 mostra les principals variables de sortida emprades per a simular dispersions.

Taula 7- Variables de Sortida

| Variable | Unitats | Descripció |
|---------------|---------|---|
| F MOLE | - | Fracció molar del gas en la mescla gas/aire |
| T | K | Temperatura del gas |
| ER | - | Relació d'Equivalència, medeix la concentració de combustible comparada amb la concentració estequiomètrica |

6 DESCRIPCIÓ DE LA INSTAL·LACIÓ EXPERIMENTAL I DE LES PROVES REALITZADES

Les proves que s'utilitzen en el marc d'aquest projecte es dugueren a terme a les instal·lacions del centre d'entrenament per la seguretat Can Padró, a Sant Vicenç de Castellet. En aquest apartat es detallen les principals característiques de la instal·lació experimental i dels equips emprats per a la realització d'aquest treball.

6.1 DESCRIPCIÓ GENERAL DE LA INSTAL·LACIÓ EXPERIMENTAL

La instal·lació experimental constava d'un tanc pressuritzat de LPG, amb una composició del 97% en volum de propà, 1,5% de butà i un altre 1,5% d'altres gasos com hidrogen i nitrogen. El tanc de 4 m³, estava situat a 45 m horitzontals del punt d'alliberament i a 15 m del nivell del terra (Figura 8).

El combustible fluïa per unes canonades de 38 mm de diàmetre amb una llargària total de 50 m fins el punt d'alliberament, el qual es situa a 1,5 m d'alçada del terra.

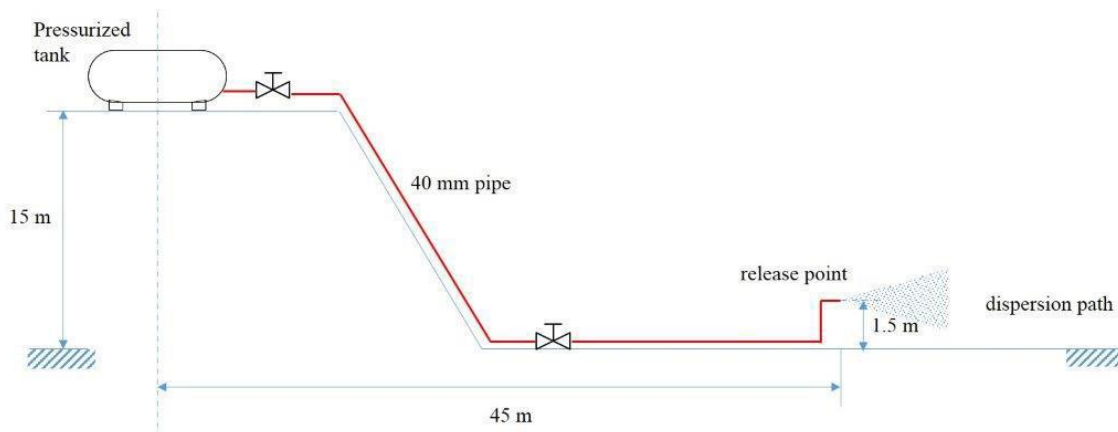


Figura 8-Esquema de l'escenari de Can Padró (Scheleder, 2015)

6.2 SISTEMES DE MESURA EMPRATS

Els experiments van consistir en la formació de núvols de LPG i el seguiment de la seva dispersió; els núvols de vapor es van monitoritzar exhaustivament per a determinar l'evolució de concentració en el temps i l'espai. Es van realitzar quatre experiments després d'uns dies de preparació de l'escenari. No obstant això, durant el primer i quart assajos les dades de pressió a la sortida del gas no van ser poder ser registrades a causa de problemes tècnics amb el sistema d'adquisició de dades. Per tant, no va ser possible calcular la velocitat de flux d'aquests assajos i d'aquí que es van descartar per al seu posterior anàlisi; per tant, només es van estudiar amb posteritat dos experiments, els anomenats P25_02 i el P25_03 (Miralles, 2015). Durant els experiments es van mesurar gran quantitat de variables; es col·locaren sensors en un àrea de 700 m² (35 m en la direcció de la dispersió i 20 m en la direcció

perpendicular a la dispersió) per mesurar les característiques de la font de dispersió i del núvol i les condicions ambientals.

Per mesurar l'estat de la pressió i la temperatura en el punt d'alliberament es van utilitzar un transductor de pressió electrònic i dos termoparells; el flux de massa alliberat en el punt de sortida es va calcular suposant una expansió isoentròpica entre el punt d'estancament i l'orifici de sortida mitjançant l'aplicació de relacions termodinàmiques (Miralles, 2015).

Pel que fa a les condicions ambientals, els paràmetres van ser monitoritzats per una estació meteorològica que enregistra la temperatura i pressió a l'ambient, la humitat relativa i la velocitat i direcció del vent cada dos segons, en un extrem de la zona de dispersió. Addicionalment es van afegir 5 sensors ultrasònics de vent per monitoritzar la velocitat i direcció del vent a dues posicions intermèdies en la zona de dispersió.

Finalment, les concentracions de LPG alliberat es van calcular indirectament obtenint les mesures de concentracions d'oxigen durant el recorregut del núvol, es va assumir que qualsevol disminució de la concentració d'oxigen era deguda al desplaçament d'oxigen causat pel núvol de LPG.

D'altra banda, els experiments també van ser gravats amb una càmera de vídeo. La Figura 9 mostra un instant de l'experiment P25_02, on es pot observar la posició dels sensors al llarg de l'àrea d'alliberament i la Taula 8 mostra les característiques principals d'aquesta prova. A la figura 10 s'observa l'evolució al llarg de l'experiment de la massa alliberada.



Figura 9- Instant de l'experiment P25_02 captat amb la càmera (Miralles, 2015). Les barres verticals d'acer contenen els diferents sensors utilitzats en l'experimentació.

Taula 8- Característiques de l'experiment P25_02

| Característiques | P25_02 |
|---|--------|
| Amb obstacle (O)/ Sense Accident (SO) | SO |
| Duració de la fuga (s) | 40 |
| Vàlvula propera al tanc (% obertura) | 25 |
| Vàlvula propera a l'orifici de sortida (% d'obertura) | 100 |
| Quantitat de massa alliberada (Kg) | 8 |

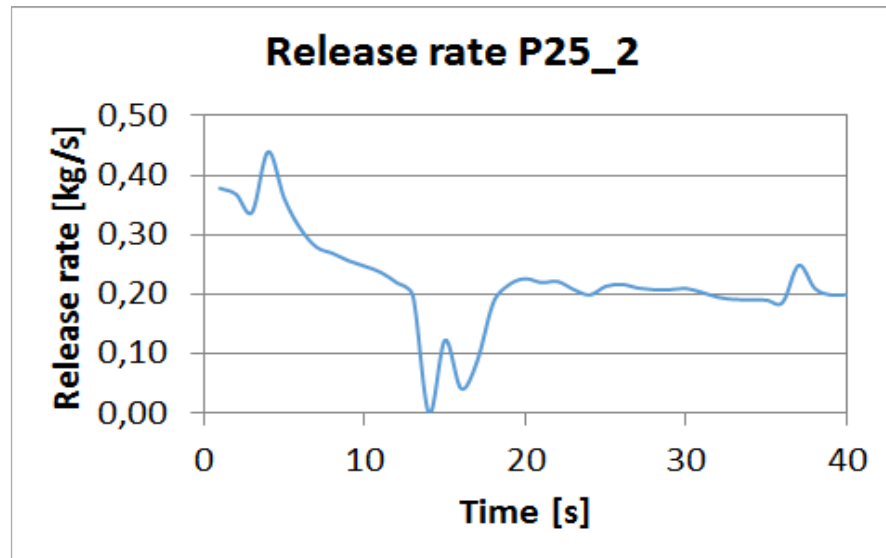


Figura 10- Evolució en Kg/s de la massa alliberada (Miralles,2015).

7 VALIDACIÓ DE L'EINA FLACS EN LA PREDICCIÓ DE L'ABAST VISIBLE DEL NÚVOL

En aquest capítol es pretén analitzar la capacitat de l'eina de simulació FLACS de recrear un aspecte particular d'un escenari experimental com és la mesura de l'abast del núvol visible. En aquest capítol, l'abast real del núvol obtingut a partir de les gravacions fetes de l'experiment P25_02 es compararà amb l'abast teòric simulat (trobat a partir del contorn de la temperatura de rosada). A més, es compararan aquestes dades amb l'abast de la concentració de LFL.

7.1 PRE-PROCESSAMENT DE LES DADES EXPERIMENTALS

Abans de processar les dades, era necessari crear una plantilla que facilités la presa de dades de dimensions del núvol visible en diferents instants de temps. D'aquesta manera, per a poder mesurar els contorns del núvol a diferents instants concrets es va dissenyar una senzilla metodologia de tractament d'imatges de vídeo que va consistir, primerament, en capturar de la seqüència de vídeo de l'experiment, un instant de temps en el que no hi hagués fuga per a poder mesurar amb l'ajuda d'una eina de tractament d'imatges, les distàncies entre els sensors, els quals són les referències seguides per a la creació d'una plantilla (Figura 11).

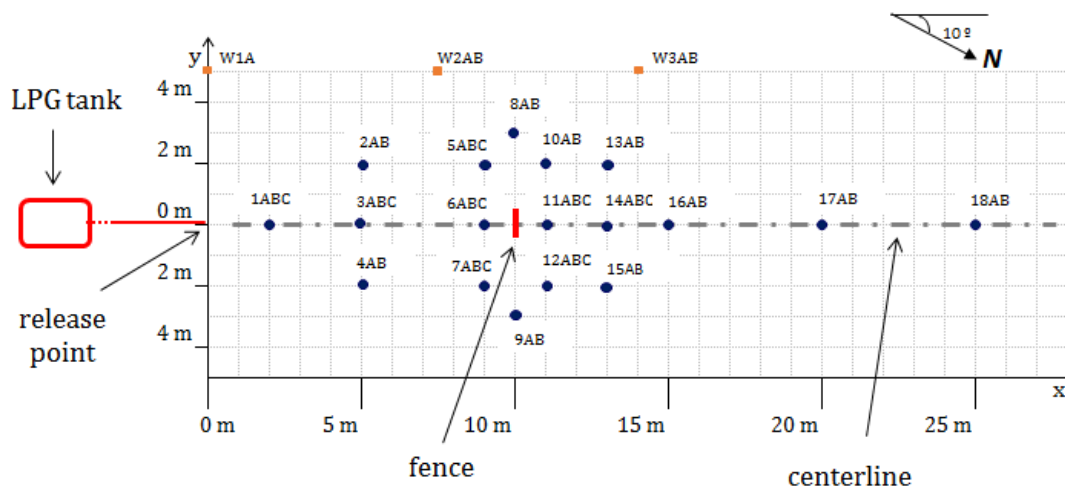


Figura 11-Situació dels sensors en 2 dels 3 eixos (Miralles, 2015).

Tal i com es veu a la imatge anterior, gràcies a aquesta informació és possible conèixer les distàncies entre els sensors en 2 dels 3 eixos possibles; l'eix z que es el que falta, es soluciona sabent l'alçada que tenen els sensors marcats anteriorment. Com es pot veure els punts on s'ubiquen els sensors tenen diferents nomenclatures, aquells que tenen la lletra A contenen un sensor a 0,1 m d'alçada, els que també tenen la lletra B contenen un sensor a 0,6 m, finalment els que tenen la lletra C contenen un sensor a 1,3 m d'alçada. Tanmateix, tots els sensors estan ubicats en barres de 1,3 m i és precisament aquesta referència la que s'agafa, juntament amb la informació de la que ja es té constància és pot

crear un disseny per a relacionar les mesures obtingudes a les gravacions fetes durant l'experiment amb les mesures reals d'aquest.

Amb l'informació extreta de la Figura 10 i l'ajuda de l'eina de tractament d'imatges GIMP, es va crear una plantilla gràfica per a l'obtenció de les dimensions del núvol en funció del temps. Aquesta plantilla (Figura 12) serveix per a contraposar diferents instants de temps capturats en les gravacions de l'experiment i, per tant, saber l'abast visible del núvol en els 3 eixos cartesianes per a qualsevol instant de temps.

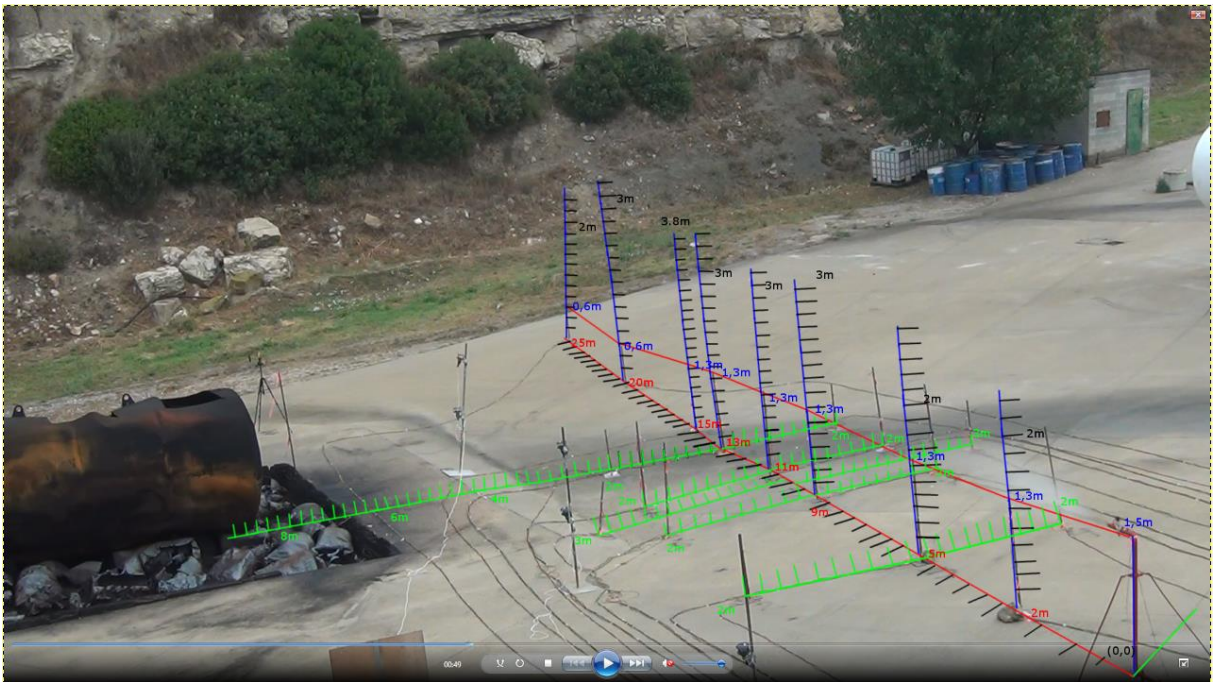


Figura 12- Plantilla feta en GIMP per a la mesura dels valors de la prova P25_02

Després de la creació de la plantilla es va decidir prendre les mesures de l'abast del núvol cada 5 segons. Aquests valors obtinguts es representen a la Taula 9, on la y és la distància mesurada a la dreta de l'eix. Les figures 13,14,15,16, 17 i 18 mostren l'evolució del núvol cada 5 segons, essent aquests instants els que s'estudiaran posteriorment.

Taula 9- Valors mesurats a la plantilla de GIMP per a la prova P25_02

| T(s) | x(m) | y(m) | z(m) |
|------|------|------|------|
| 5 | 5,4 | 0,4 | 1,8 |
| 10 | 12 | 2 | 2 |
| 15 | 18 | 4 | 2 |
| 20 | 22 | 5 | 2,2 |
| 25 | 23 | 6,2 | 2,2 |
| 30 | 25 | 7,2 | 2,4 |

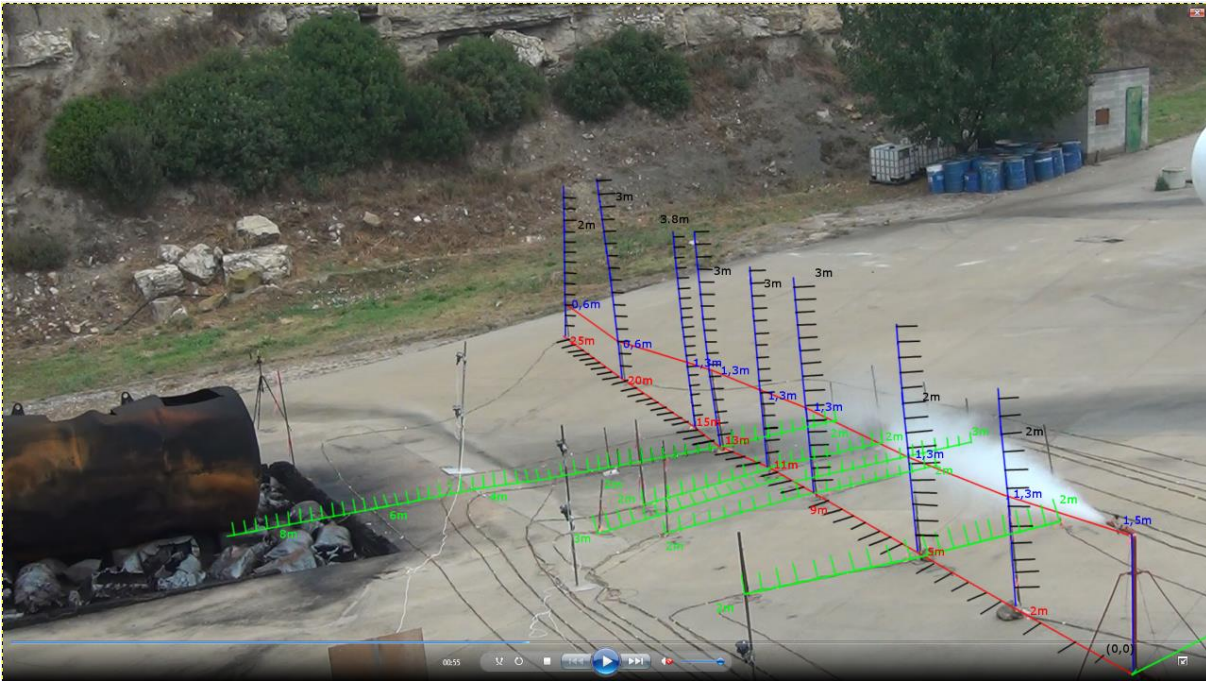


Figura 13- Dispersió a l' instant 5 s.

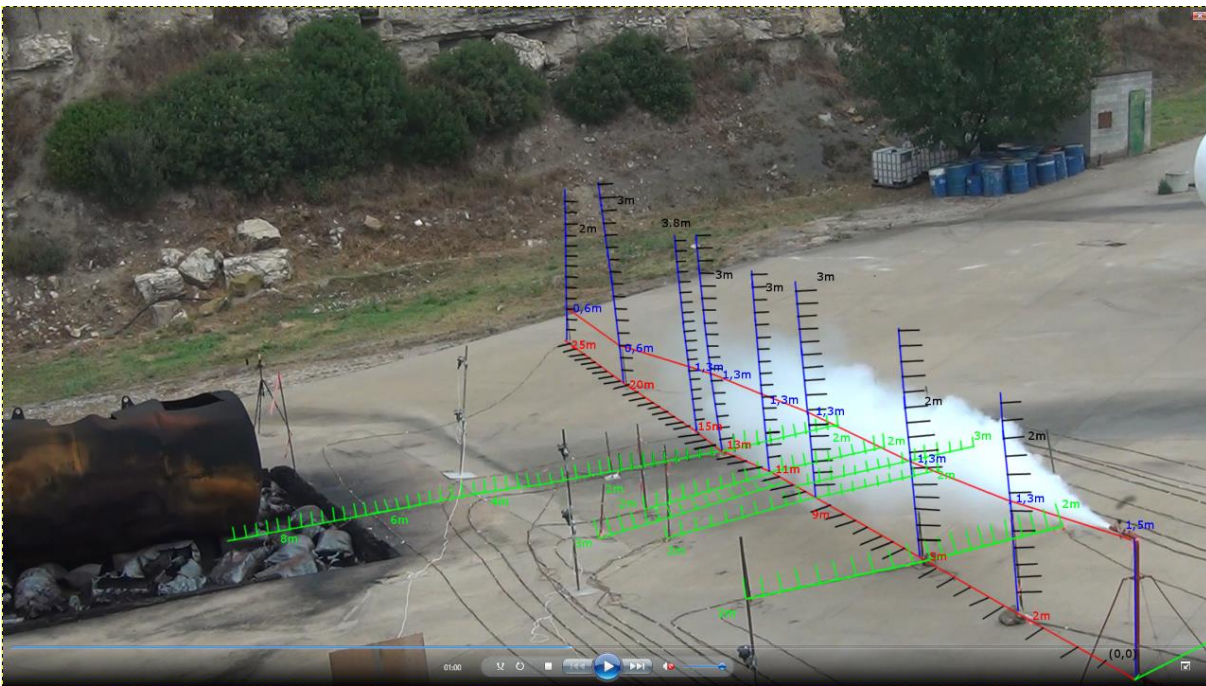


Figura 14- Dispersió a l' instant 10 s.

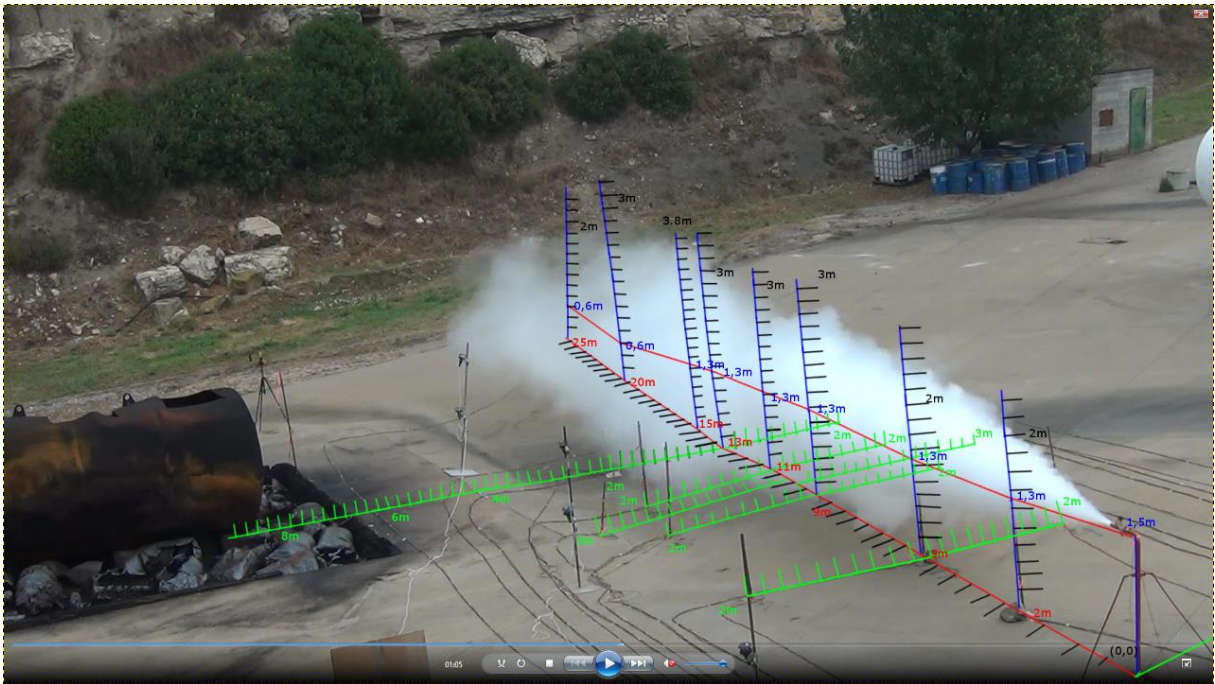


Figura 15- Dispersió a l'instant 15 s.

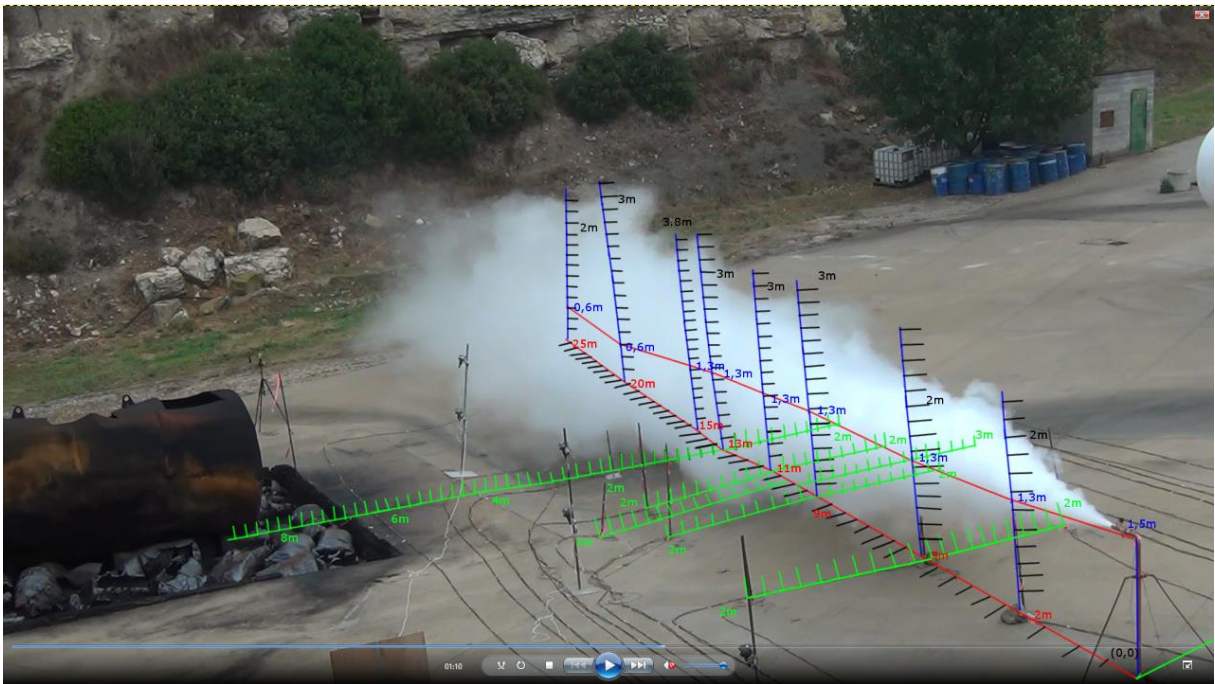


Figura 16- Dispersió a l'instant 20 s.

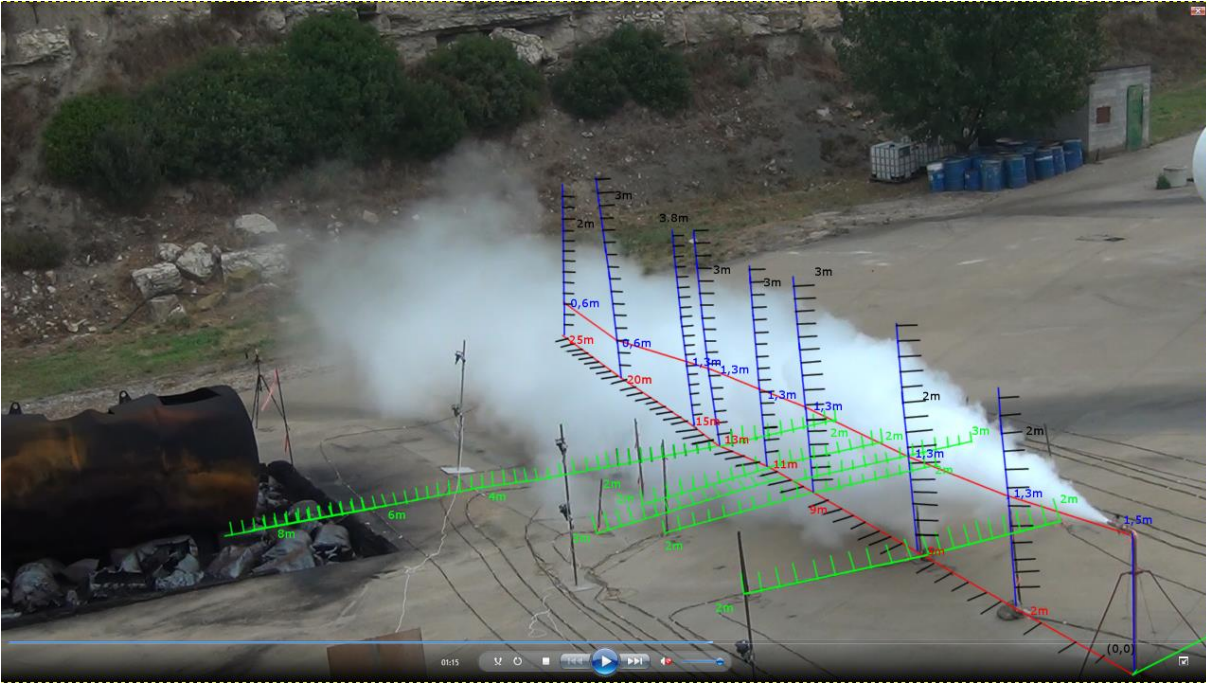


Figura 17-Dispersió a l' instant 25 s.

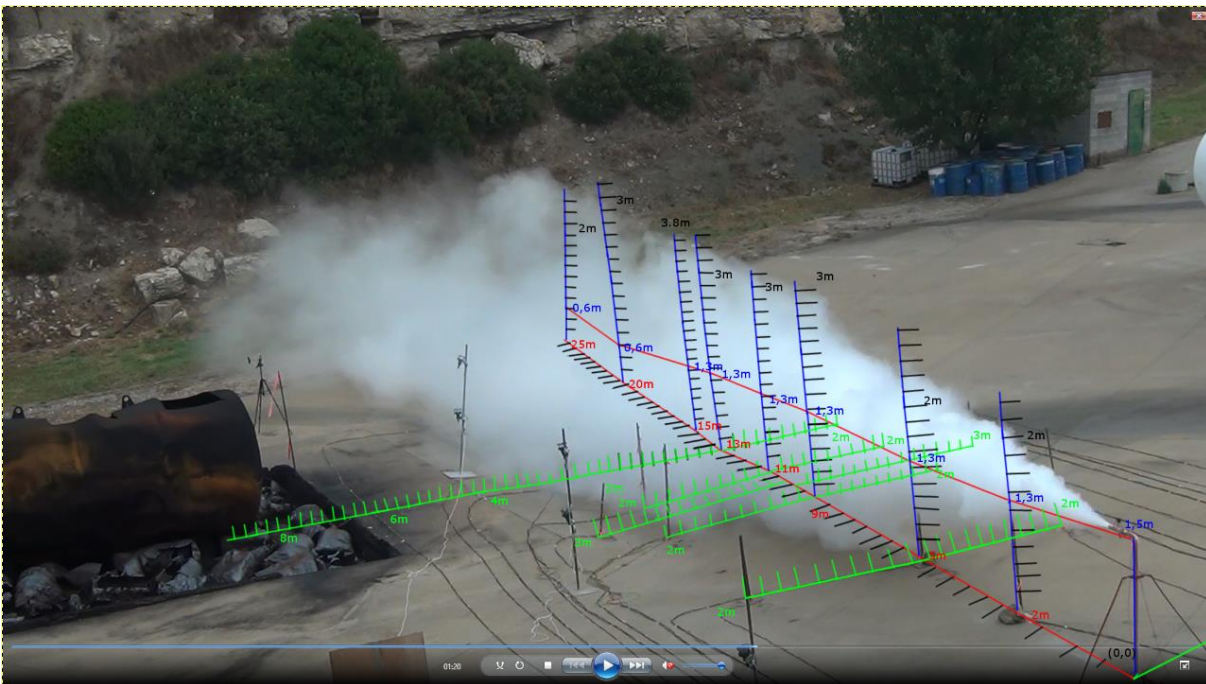


Figura 18- Dispersió a l' instant 30 s.

7.2 CONSTRUCCIÓ DE L'ESCENARI EXPERIMENTAL AMB L'EINA FLACS

Respecte a la feina realitzada amb l'eina CFD, el primer pas era construir un escenari que fos el més representatiu possible de l'escenari experimental. En aquest cas, era relativament senzill ja que l'experiment es va realitzar en un camp sense obstacles ni desnivells. A continuació es pot veure un exemple de l'eina CAD de FLACS per a la creació d'escenaris (Figura 19).

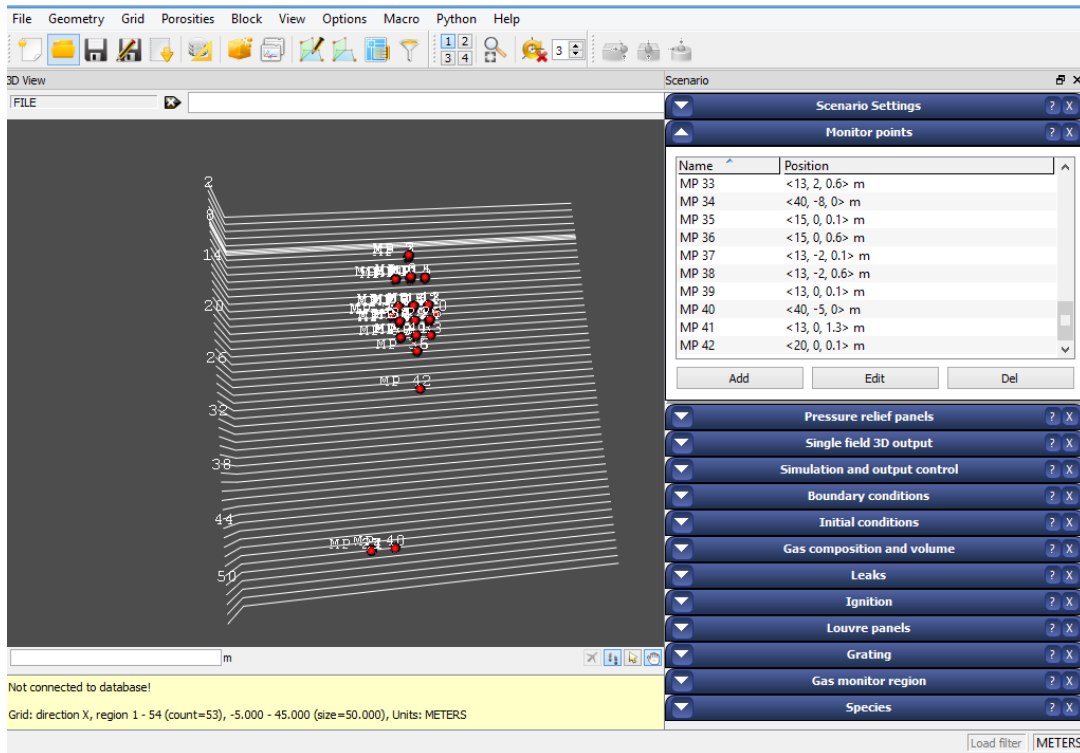


Figura 19- Construcció Escenari eina CAD FLACS.

Juntament amb el disseny de l'escenari, es van fixar en aquest les condicions ambientals (Figura 20) on s'inclou la velocitat (0,7 m/s) i direcció del vent (185°), el punt exacte on s'iniciaria l'alliberament de la dispersió (1,5 m a l'eix Z i 0 per a X i Y), el tipus de dispersió (Jet), el flux màssic (0,2 Kg/s) i el tipus de producte emprat (propà); i finalment, els punts on es monitoritzaria l'evolució de la dispersió, que coincideixen amb les situacions físiques dels sensors emprats durant l'experiment.

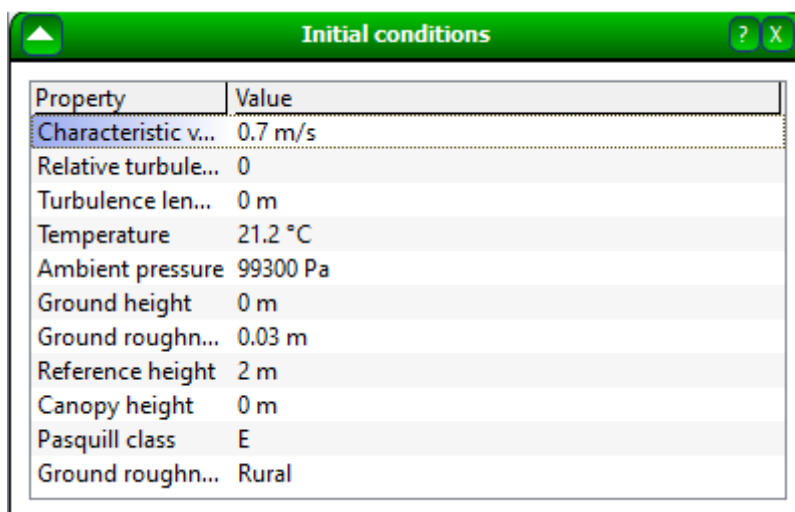


Figura 20- Variables inicials especificades per l'escenari P25_02.

7.3 SIMULACIÓ DE L'ESCENARI

Una vegada construït l'escenari amb totes les variables d'entrada necessàries per a realitzar la simulació, a continuació es realitza un mallat (Figura 21) de l'escenari per a poder seguir amb aquesta; en la simulació realitzada el mallat compren un domini de -5 a 45 metres per a l'eix de les X, un domini de -24 a 24 m per a l'eix de les Y i un domini de 0 a 10 m per a l'eix de les Z amb un tamany de cel·la de 5 metres. El següent pas és determinar les variables de sortida que el simulador haurà d'enregistrar i mesurar durant el temps que operi. Finalment, es defineixen el temps de durada de la simulació, el temps d'espera des de que s'inicia la simulació fins a l'inici de la dispersió i el temps d'espera des de que s'inicia la simulació fins que el vent passa de 0 m/s a la velocitat definida anteriorment.

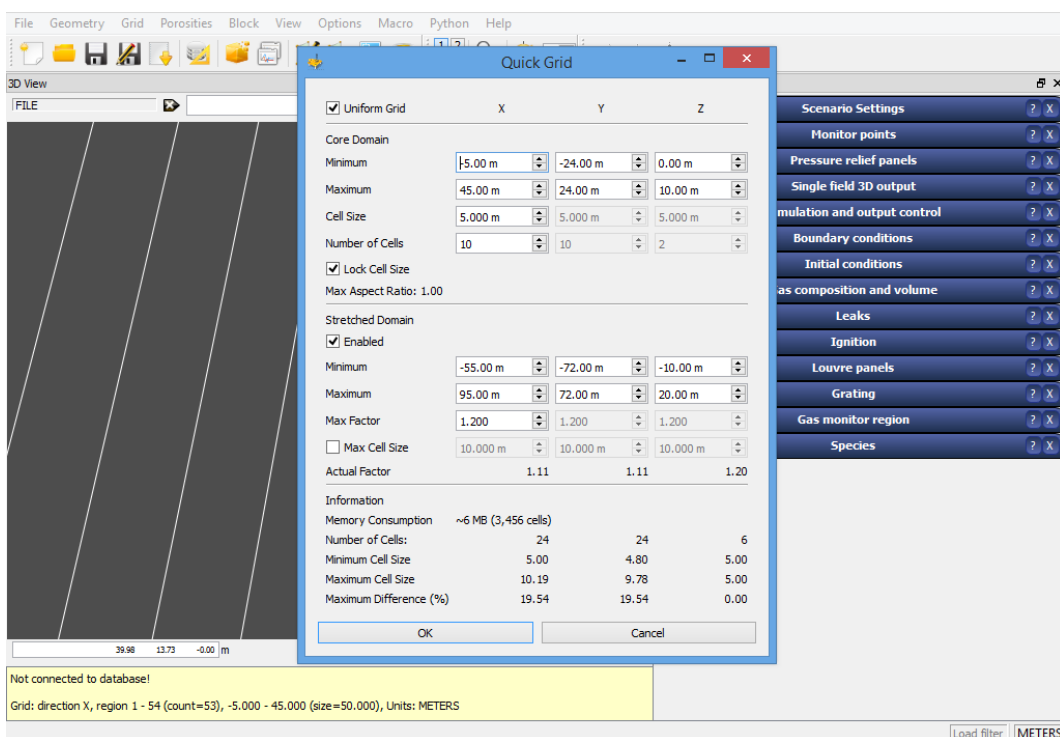
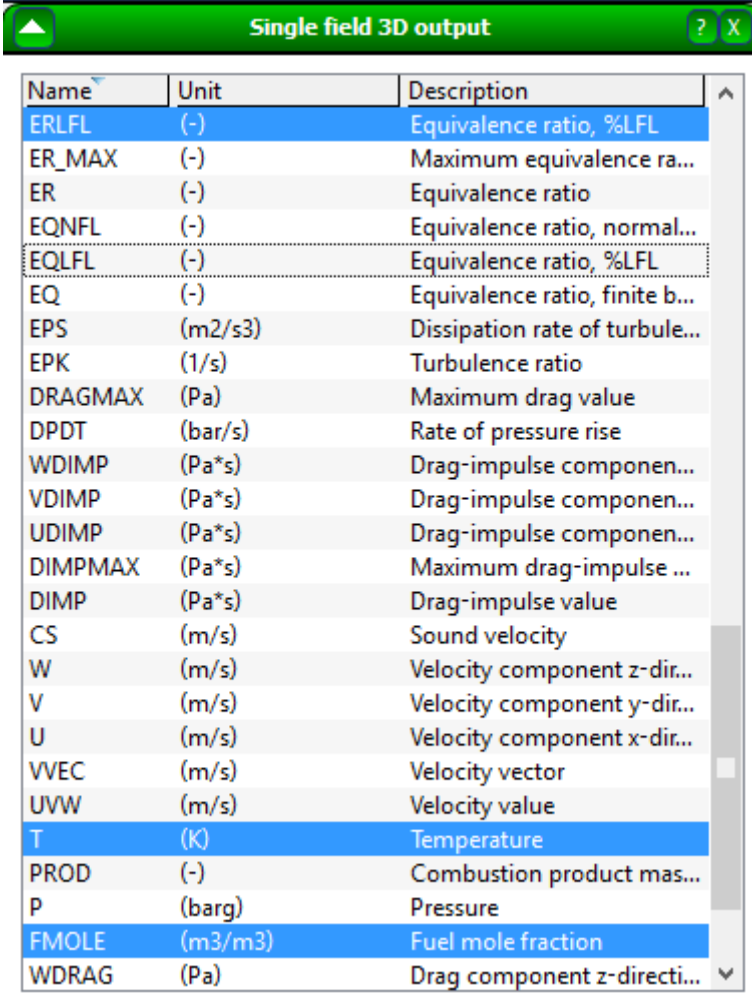


Figura 21- Instant on s'especifica les característiques del mallat.

Com es pot veure (Figura 22), les variables de sortida escollides van ser la Temperatura (en K), la concentració del flux molar (F mole en %vol) i la relació d'equivalència de LFL (ER).



| Name | Unit | Description |
|----------|---------|--------------------------------|
| ERLFL | (-) | Equivalence ratio, %LFL |
| ER_MAX | (-) | Maximum equivalence ra... |
| ER | (-) | Equivalence ratio |
| EQNFL | (-) | Equivalence ratio, normal... |
| EQLFL | (-) | Equivalence ratio, %LFL |
| EQ | (-) | Equivalence ratio, finite b... |
| EPS | (m2/s3) | Dissipation rate of turbule... |
| EPK | (1/s) | Turbulence ratio |
| DRAGMAX | (Pa) | Maximum drag value |
| DPDT | (bar/s) | Rate of pressure rise |
| WDIMP | (Pa*s) | Drag-impulse componen... |
| VDIMP | (Pa*s) | Drag-impulse componen... |
| UDIMP | (Pa*s) | Drag-impulse componen... |
| DIMPMAX | (Pa*s) | Maximum drag-impulse ... |
| DIMP | (Pa*s) | Drag-impulse value |
| CS | (m/s) | Sound velocity |
| W | (m/s) | Velocity component z-dir... |
| V | (m/s) | Velocity component y-dir... |
| U | (m/s) | Velocity component x-dir... |
| VVEC | (m/s) | Velocity vector |
| UVW | (m/s) | Velocity value |
| T | (K) | Temperature |
| PROD | (-) | Combustion product mas... |
| P | (barg) | Pressure |
| FMOLE | (m3/m3) | Fuel mole fraction |
| WDRAG | (Pa) | Drag component z-directi... |

Figura 22- Elecció de les variables de sortida per a la simulació.

En primer lloc, la temperatura és la variable que en un primer moment es creu més indicativa pel fet que, tal i com ja s'ha comentat, teòricament el núvol visible es pot identificar a partir de la temperatura de rosada. La temperatura de rosada és doncs el valor frontera teòric entre el perfil del núvol i l'exterior, ja que és en aquest punt en què la humitat ambiental condensa fins fer-se visible en el sí del núvol. Per l'experiment P25_02, tenint en compte la temperatura a l'ambient (294.35 K) i la humitat relativa (86.8%), el valor de temperatura de rosada va ser, seguint l'equació [1], de 292 K. Les dades de temperatura que es poden obtenir amb FLACS poden ser mesures puntuals (x,y,z) o bé seccions en qualsevol dels tres plans (x,y; x,z; y,z) per instants de temps determinats (vegeu com a exemple la Figura 23 amb el perfil de temperatures en l'instant 15 s, on la isolínia de la temperatura de rosada arriba a 7,3m). A l'annex 12.2 es recopila la resta d'instants de temps .

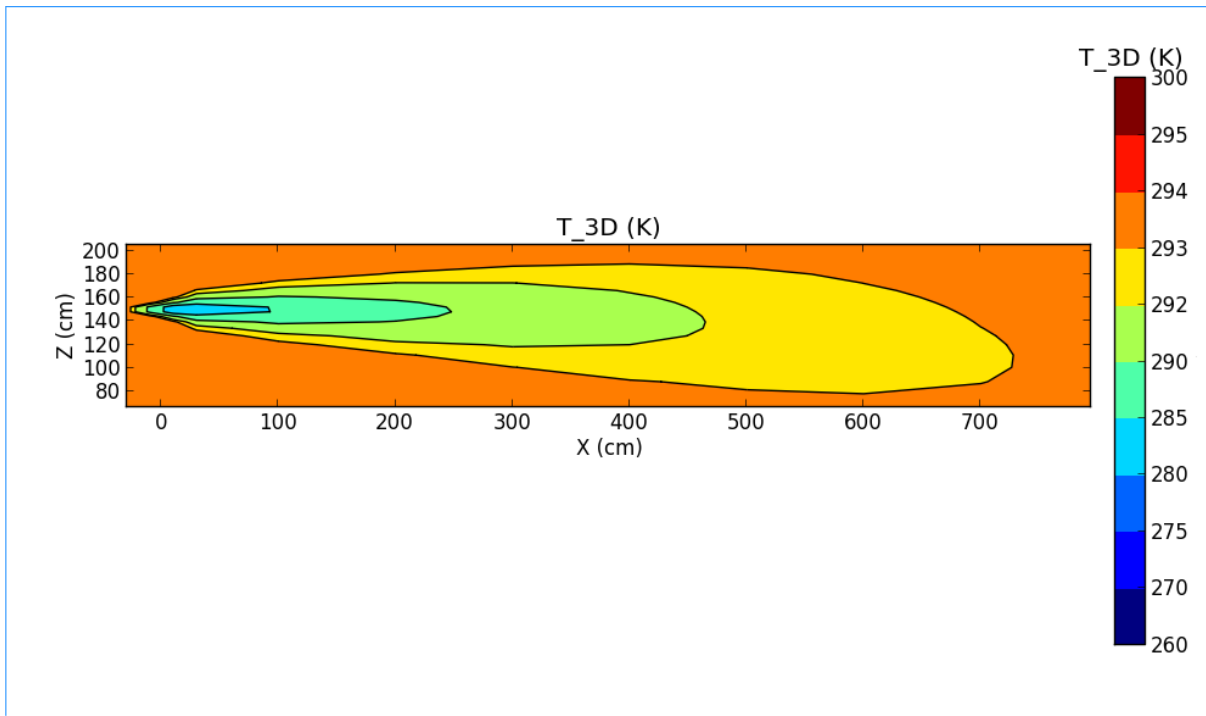


Figura 23- Perfil de temperatures del núvol en el pla X-Z en l'instant 15 s.

En segon lloc, la concentració de producte dins el núvol és un altre molt bon indicador ja que molts dels models matemàtics existents l'empren com a dada en els seus càlculs. En la Figura 24 es pot veure, a tall d'exemple, el perfil de concentracions del núvol en l'instant 15 s, per a LFL una distància X de 9,7 m i 0,5 LFL a 10,5 m ; a l'annex 12.2 es recopila la resta d'instants de temps. En aquests perfils de concentracions, es va mirar d'identificar l'abast a la que arriba la isolínia de concentració igual al LFL (2,1% pel propà), com a la distància teòrica a la que arriba el núvol inflamable i l'abast a la que arriba la isolínia de concentració igual a la meitat del LFL (1.05%), com a la distància d'intervenció fixada habitualment per als cossos de gestió de l'emergència.

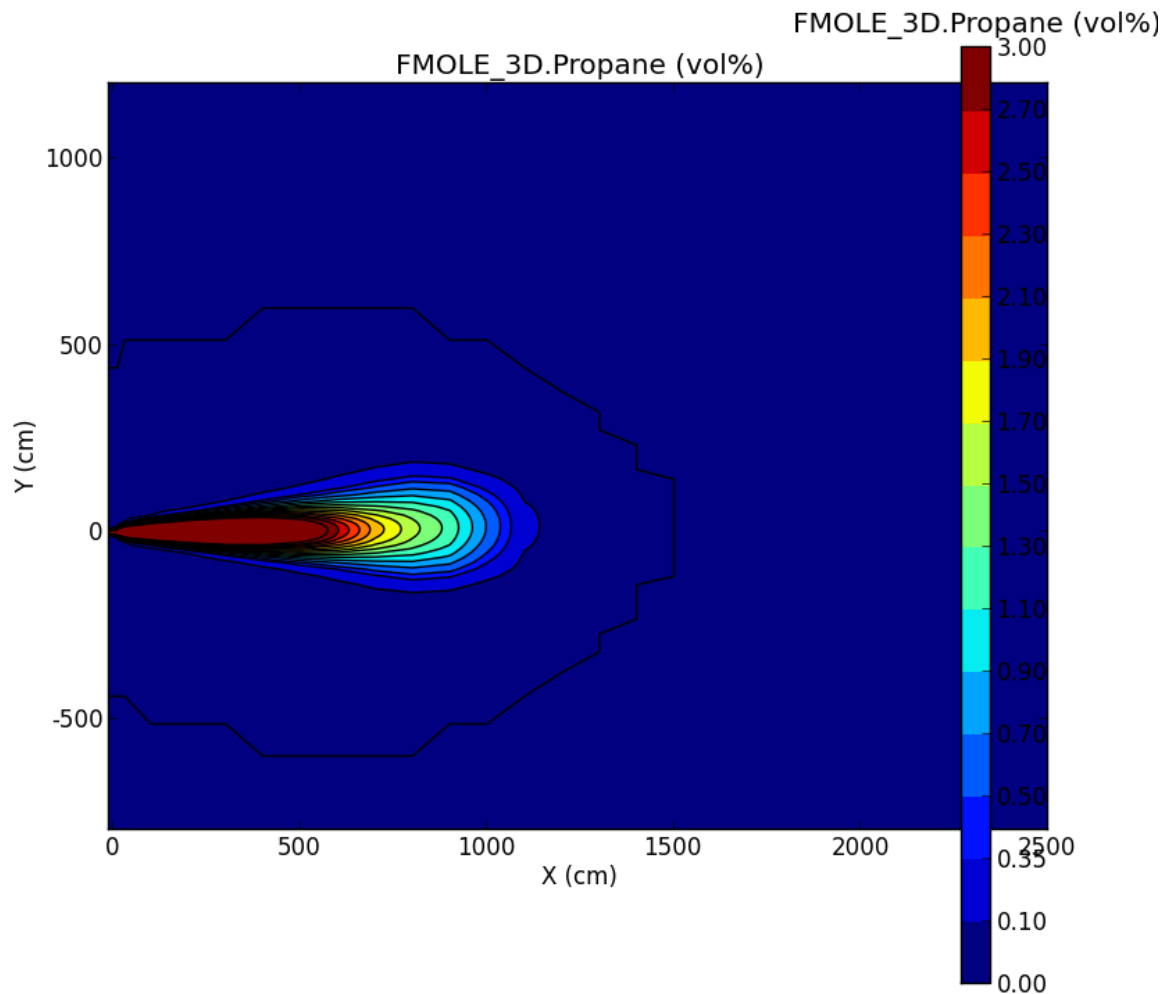


Figura 24- Dispensió del núvol en l'instant 10 s en el pla X-Y per a la Fracció molar.

7.4 COMPARATIVA DADES

Després d'analitzar els diferents instants del núvol simulat en els diferents eixos, es van obtenir les taules 10,11 i 12 on s'hi recopilen els valors de l'abast del núvol en els tres eixos cartesianes per als tres llindars diferents: el llindar de temperatura de rosada (Taula 10), el llindar de concentració LFL (taula 11) i el llindar de concentració 0.5LFL (Taula 12).

Taula 10- Abast del núvol determinat a partir de la temperatura de rosada (292K).

| $T(s)$ | $x(m)$ | $y(m)$ | $z(m)$ |
|--------|--------|--------|--------|
| 5 | 5 | 0,4 | 1,84 |
| 10 | 10,5 | 0,9 | 1,8 |
| 15 | 7,5 | 0,8 | 1,85 |
| 20 | 6,5 | 0,8 | 1,8 |
| 25 | 9,7 | 2,5 | 2 |
| 30 | 10,7 | 4,5 | 1,9 |

Taula 11- Abast del núvol al llindar de la concentració LFL..

| T(s) | x(m) | y(m) | z(m) |
|------|------|------|------|
| 5 | 5 | 0,48 | 1,8 |
| 10 | 9 | 1,2 | 1,95 |
| 15 | 9,7 | 1,6 | 1,8 |
| 20 | 9 | 1,2 | 1,6 |
| 25 | 7 | 1,7 | 1,8 |
| 30 | 6 | 2 | 1,9 |

Taula 12- Abast del núvol al llindar de la concentració 0.5 LFL..

| T(s) | x(m) | y(m) | z(m) |
|------|------|------|------|
| 5 | 5,2 | 0,48 | 1,8 |
| 10 | 10,5 | 1,5 | 1,95 |
| 15 | 14 | 1,6 | 1,8 |
| 20 | 15 | 1,2 | 1,6 |
| 25 | 7,2 | 1,8 | 1,8 |
| 30 | 7 | 2 | 1,9 |

L'abast real del núvol obtingut a partir de l'anàlisi d'imatges visibles, es va comparar amb l'abast del núvol simulat segons els tres indicadors mencionats a partir de les mesures següents:

$$E_{abs_i} = Mesura\ video_i - Mesura\ FLACS_i \quad [3]$$

$$\sum E_{R_i} = \frac{\sum E_{abs_i}}{\sum Mesures\ videos_i} \times 100 \quad [4]$$

D'aquesta manera es van calcular els errors absoluts de l'abast del núvol (E_{abs}) per a cada instant de temps i en cada eix a partir de les distàncies mesurades a la plantilla de GIMP i les mesurades a partir dels perfils de temperatura i concentració simulats amb FLACS. Després d'obtenir els errors absoluts de cada instant analitzat, el següent pas era fer una comparativa global per a cadascun dels tres criteris establerts. Per aquesta raó es van calcular els errors relatius (E_R) acumulant els valors consecutivament a cadascun dels instants d'estudi per a així obtenir una evolució dels errors comesos al llarg de la dispersió. A les taules 13, 14 i 15 es recopilen els errors absoluts i acumulats per als tres criteris (temperatura de rosada, LFL i 0.5·LFL).

Taula 13- Comparativa de l'abast del núvol a partir de la temperatura de rosada

| T(s) | Eabs x (m) | Eabs y (m) | Eabs z (m) | $\sum E_{Rx}$ (%) | $\sum E_{Ry}$ (%) | $\sum E_{Rz}$ (%) | E_{Rx} (%) | E_{Ry} (%) | E_{Rz} (%) |
|------|------------|------------|------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|--------------|--------------|
| 5 | 0,4 | 0 | 0,04 | 7% | 0% | 2% | 7% | 0% | 2% |
| 10 | 1,5 | 1,1 | 0,2 | 11% | 46% | 6% | 13% | 55% | 10% |
| 15 | 10,7 | 3,2 | 0,15 | 35% | 67% | 7% | 58% | 80% | 8% |
| 20 | 15,5 | 4,2 | 0,4 | 49% | 75% | 10% | 70% | 84% | 18% |
| 25 | 13,3 | 3,7 | 0,2 | 51% | 69% | 10% | 58% | 60% | 9% |
| 30 | 14,3 | 2,7 | 0,5 | 53% | 60% | 12% | 57% | 38% | 21% |

Taula 14- Comparativa de l'abast del núvol a partir del LFL

| T(s) | Eabs x (m) | Eabs y (m) | Eabs z (m) | $\sum E_{Rx}$ (%) | $\sum E_{Ry}$ (%) | $\sum E_{Rz}$ (%) | E_{Rx} (%) | E_{Ry} (%) | E_{Rz} (%) |
|------|------------|------------|------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|--------------|--------------|
| 5 | 0,4 | 0,08 | 0 | 7% | 20% | 0% | 7% | 20% | 0% |
| 10 | 3 | 0,8 | 0,05 | 20% | 37% | 1% | 25% | 40% | 3% |
| 15 | 8,3 | 2,4 | 0,2 | 33% | 51% | 4% | 46% | 60% | 10% |
| 20 | 13 | 3,8 | 0,6 | 43% | 62% | 11% | 59% | 76% | 27% |
| 25 | 16 | 4,5 | 0,2 | 51% | 66% | 10% | 70% | 73% | 9% |
| 30 | 19 | 5,2 | 0,5 | 57% | 68% | 12% | 76% | 72% | 21% |

Taula 15- de l'abast del núvol a partir de la meitat del valor de LFL.

| T(s) | Eabs x (m) | Eabs y (m) | Eabs z (m) | $\sum E_{Rx}$ (%) | $\sum E_{Ry}$ (%) | $\sum E_{Rz}$ (%) | E_{Rx} (%) | E_{Ry} (%) | E_{Rz} (%) |
|------|------------|------------|------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|--------------|--------------|
| 5 | 0,2 | 0,08 | 0 | 4% | 20% | 0% | 4% | 20% | 0% |
| 10 | 1,5 | 0,5 | 0,05 | 10% | 24% | 1% | 13% | 25% | 3% |
| 15 | 4 | 2,4 | 0,2 | 16% | 47% | 4% | 22% | 60% | 10% |
| 20 | 7 | 3,8 | 0,6 | 22% | 59% | 11% | 32% | 76% | 27% |
| 25 | 15,2 | 4,5 | 0,2 | 35% | 64% | 10% | 66% | 73% | 9% |
| 30 | 18 | 5,2 | 0,5 | 44% | 66% | 12% | 72% | 72% | 21% |

Com a conseqüència dels resultats obtinguts, es pot extreure que el millor criteri per a determinar de manera simulada l'abast del núvol visible en l'eix X és mitjançant la variable LFL/2. També es pot observar com amb tots tres criteris, a l'eix z és el que s'hi exhibeix menys error, això pot ser degut a que és l'eix amb les distàncies més petites dels tres. En la Figura 25 mostra la comparativa dels errors relatius per a cada criteri seguint les 3 diferents variables (temperatura, LFL, 0.5LFL).

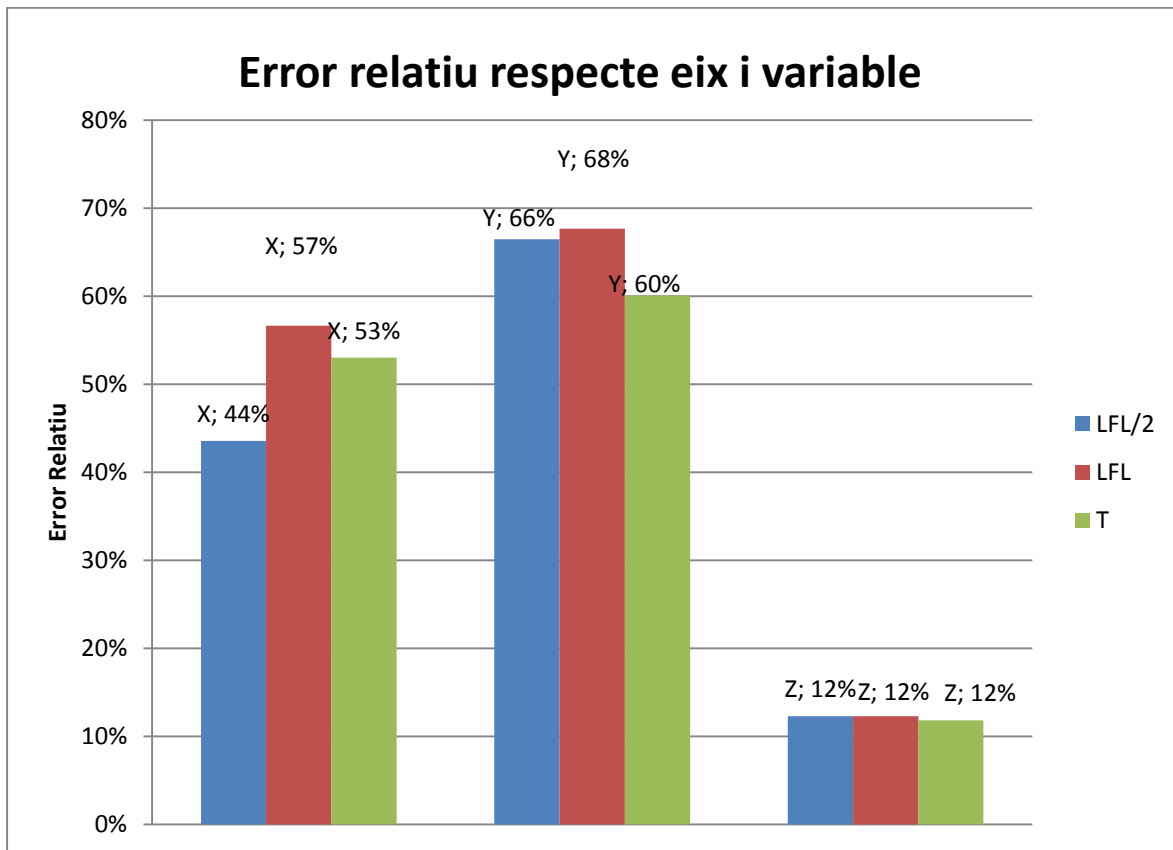


Figura 25- Resultats generals dels errors relatius a cada variable pels 3 eixos cartesianes.

En la figura 25, s'observa que, tret de l'abast en z, els criteris establerts no són prou precisos per predir l'abast del núvol visible en x i en y. En el cas particular de l'estudi on es centra particularment en l'eix X ja que es l'eix més significatiu es troba que la variable que millor ajusta és 0,5 LFL i la que pitjor és LFL amb 13 punts de diferència, en aquest cas es pot intuir que el límit del perfil del núvol és un valor inferior a 0,5 LFL i per tant LFL queda molt distanciat. Es tractarà amb més profunditat en el següent apartat l'estudi d'aquest perfil a diferents fraccions de LFL.

7.4.1 Selecció d'un nou criteri: predicció de l'abast del núvol visible a partir de diferents fraccions de LFL

En aquest punt i després de realitzar diferents proves, es va realitzar l'estudi de perfils de LFL a diferents valors d'aquest (10%, 25% i 40%).

Els seus valors de dispersió són els següents (Taula 16,17 i 18):

Taula 16- Resultats de la simulació per a la variable Fmole al 10% LFL.

| T(s) | x(m) | y(m) | z(m) |
|------|------|------|------|
| 5 | 6 | 0,49 | 1,95 |
| 10 | 12,4 | 1,8 | 2,2 |
| 15 | 17 | 3,6 | 2 |
| 20 | 20,2 | 5,7 | 1,8 |
| 25 | 24,3 | 8 | 1,9 |
| 30 | 27 | 8 | 2 |

Taula 17- Resultats de la simulació per a la variable Fmole al 25% LFL.

| T(s) | x(m) | y(m) | z(m) |
|------|------|------|------|
| 5 | 5,7 | 0,48 | 1,9 |
| 10 | 12 | 1,8 | 2,1 |
| 15 | 16,8 | 3,4 | 1,8 |
| 20 | 19,8 | 5 | 1,6 |
| 25 | 23 | 6 | 2,1 |
| 30 | 25,8 | 7 | 2 |

Taula 18- Resultats de la simulació per a la variable Fmole al 40% LFL.

| T(s) | x(m) | y(m) | z(m) |
|------|------|------|------|
| 5 | 5,3 | 0,48 | 1,8 |
| 10 | 11 | 1,6 | 1,95 |
| 15 | 15,4 | 1,6 | 1,9 |
| 20 | 16 | 1,2 | 1,6 |
| 25 | 7,6 | 1,9 | 1,8 |
| 30 | 7,3 | 2,1 | 1,9 |

Tal i com es va fer per a les altres variables, es va realitzar l'estudi de comparabilitat amb el contorn del núvol visible donant els següents resultats (Taula 19,20 i 21):

Taula 18- Comparativa per a la variable Fmole al 10% LFL.

| T(s) | Eabs x (m) | Eabs (m) | y | Eabs (m) | z | $\sum E_{RX}$ (%) | $\sum E_{RY}$ (%) | $\sum E_{RZ}$ (%) | E_{RX} (%) | E_{RY} (%) | E_{RZ} (%) |
|------|------------|----------|---|----------|---|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|--------------|--------------|
| 5 | 0,6 | 0,09 | | 0,15 | | 11% | 23% | 8% | 11% | 23% | 8% |
| 10 | 0,4 | 0,2 | | 0,2 | | 6% | 12% | 9% | 3% | 10% | 10% |
| 15 | 1 | 0,4 | | 0 | | 6% | 11% | 6% | 6% | 10% | 0% |
| 20 | 1,8 | 0,7 | | 0,4 | | 7% | 12% | 9% | 8% | 14% | 18% |
| 25 | 1,3 | 1,8 | | 0,3 | | 6% | 18% | 10% | 6% | 29% | 14% |
| 30 | 2 | 0,8 | | 0,4 | | 7% | 16% | 12% | 8% | 11% | 17% |

Taula 19- Comparativa per a la variable Fmole al 25% LFL.

| T(s) | Eabs x (m) | Eabs (m) | y | Eabs (m) | z | $\sum E_{RX}$ (%) | $\sum E_{RY}$ (%) | $\sum E_{RZ}$ (%) | E_{RX} (%) | E_{RY} (%) | E_{RZ} (%) |
|------|------------|----------|---|----------|---|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|--------------|--------------|
| 5 | 0,3 | 0,08 | | 0,1 | | 6% | 20% | 6% | 6% | 20% | 6% |
| 10 | 0 | 0,2 | | 0,1 | | 2% | 12% | 5% | 0% | 10% | 5% |
| 15 | 1,2 | 0,6 | | 0,2 | | 4% | 14% | 7% | 7% | 15% | 10% |
| 20 | 2,2 | 0 | | 0,6 | | 6% | 8% | 13% | 10% | 0% | 27% |
| 25 | 0 | 0,2 | | 0,1 | | 5% | 6% | 11% | 0% | 3% | 5% |
| 30 | 0,8 | 0,2 | | 0,4 | | 4% | 5% | 12% | 3% | 3% | 17% |

Taula 20- Comparativa per a la variable Fmole al 40% LFL.

| T(s) | Eabs x (m) | Eabs (m) | y | Eabs (m) | z | $\sum E_{RX}$ (%) | $\sum E_{RY}$ (%) | $\sum E_{RZ}$ (%) | E_{RX} (%) | E_{RY} (%) | E_{RZ} (%) |
|------|------------|----------|---|----------|---|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|--------------|--------------|
| 5 | 0,1 | 0,08 | | 0 | | 2% | 20% | 0% | 2% | 20% | 0% |
| 10 | 1 | 0,4 | | 0,05 | | 8% | 20% | 3% | 8% | 20% | 3% |
| 15 | 2,6 | 2,4 | | 0,1 | | 14% | 60% | 5% | 14% | 60% | 5% |
| 20 | 6 | 3,8 | | 0,6 | | 27% | 76% | 27% | 27% | 76% | 27% |
| 25 | 15,4 | 4,3 | | 0,4 | | 67% | 69% | 18% | 67% | 69% | 18% |
| 30 | 17,7 | 5,1 | | 0,5 | | 71% | 71% | 21% | 71% | 71% | 21% |

Després de realitzar l'estudi s'observa com el valo de la fracció de LFL que més s'aproxima a l'abast visible del núvol es aquella amb un 25% de LFL, com aclaració dels resultats obtinguts en la figura 26 es mostra la comparativa dels errors relatius per a cada criteri seguint les 3 diferents variables (10%LFL, 25% LFL i 40% LFL):

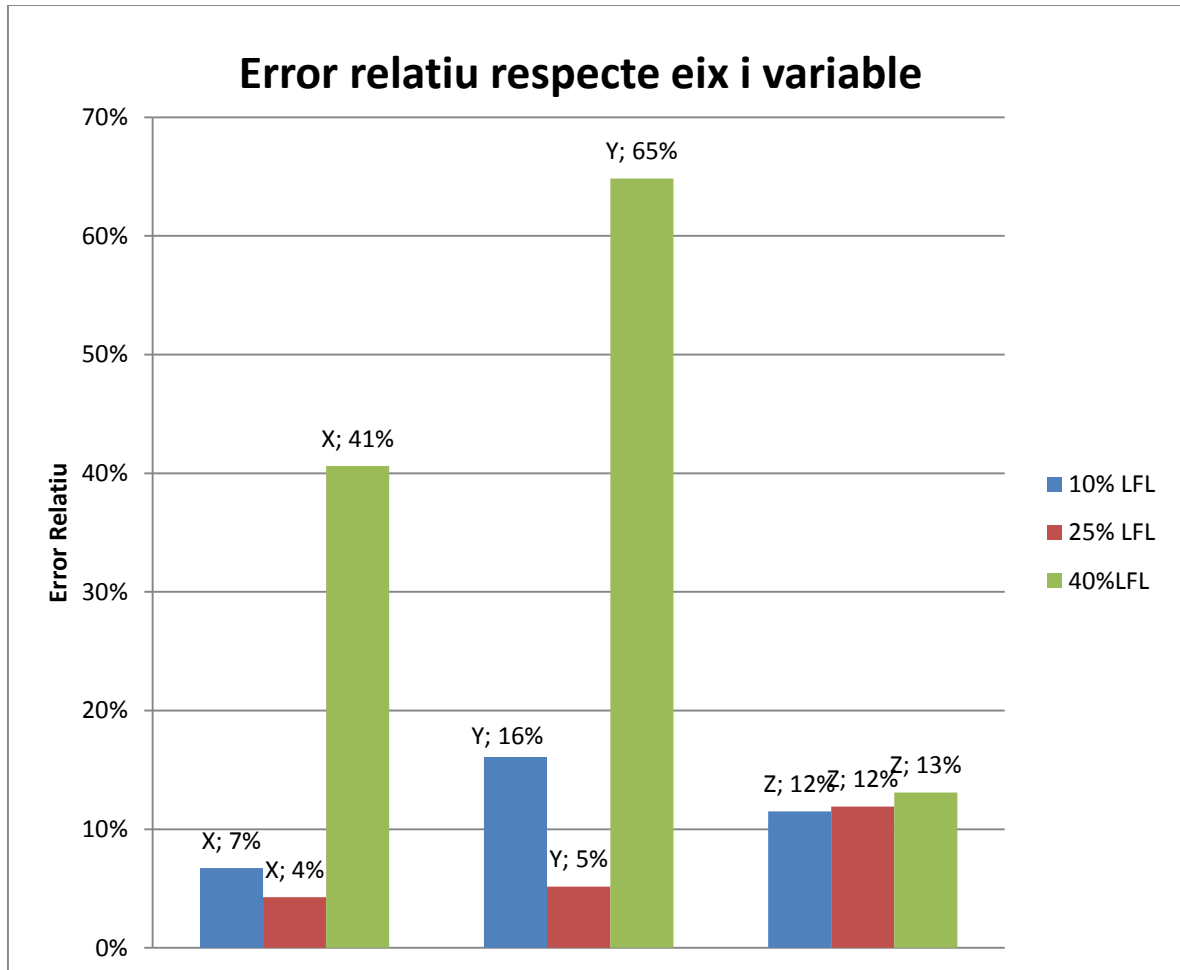


Figura 26- Resultats generals dels errors relatius pels diferents LFL en els 3 eixos cartesianes

En aquest punt, obtenint uns valors d'error relatiu tant baixos, es pot considerar que la variable que millor defineix l'abast del núvol visible és 25% de LFL i per tant és el punt de referència pel qual començar a estudiar el contorn visible d'una dispersió per a futurs estudis.

7.5 ESTUDI DE SENSIBILITAT

Per finalitzar el treball, es va realitzar un estudi de sensibilitat de les variables atmosfèriques amb la intenció de validar els resultats obtinguts de l'abast del núvol amb la variable de concentració 25% de LFL. Per realitzar l'estudi de sensibilitat es segueix la metodologia exposada a Bartelink (Bartelink, 1998). Es realitzen tres simulacions (Taula 18). A la primera simulació els paràmetres estudiats adopten el valor establert per defecte al cas base. A les dues restants els paràmetres estudiats adopten un valor

incrementat un 10% i disminuït també un 10%, respectivament. Emprant els resultats obtinguts es calcula el coeficient de sensibilitat o sensibilitat relativa mitjançant la següent equació:

Taula 18- Modificacions a les condicions de cada simulació.

| Variables | Cas Base | Test 1 | Test 2 |
|-----------|----------|--------|--------|
| Vw | 0% | +10% | -10% |
| T | 0% | +10% | -10% |
| P | 0% | +10% | -10% |
| Roughness | 0% | +10% | -10% |

$$RS = \frac{|R_{+10\%} - R_{-10\%}|}{0,2 R} \quad [5]$$

On RS és la sensibilitat relativa, $R_{+10\%}$ és la variable de sortida resultat de la simulació on el paràmetre estudiat s'incrementa un 10% el seu valor per defecte, $R_{-10\%}$ és la variable de sortida resultant de la simulació on el paràmetre disminueix un 10% el seu valor per defecte i R és el valor de la variable de sortida resultant de la simulació on el paràmetre adopta el seu valor per defecte.

El grau de sensibilitat es determina amb el valor de la sensibilitat relativa. Els valors de RS inferiors a 0,5 indiquen insensibilitat i sensibilitat baixa si es troben entre 0,5 i 1. Si RS és superior a 1 però menor de 2, la sensibilitat és moderada i és alta si és superior a 2. A partir d'aquest barem és possible detectar els paràmetres sensibles.

Amb això, es van obtenir uns valors de l'abast en l'eix X del núvol en aquestes simulacions (Taula 19).

Taula 19- Valors de l'abast x per a les diferents probes.

| T(s) | Cas Base | Test 1 | Test 2 |
|------|----------|--------|--------|
| 5 | 5,7 | 5,9 | 5,8 |
| 10 | 12 | 13 | 13,5 |
| 15 | 16,8 | 17 | 17,2 |
| 20 | 19,8 | 19 | 20 |
| 25 | 23 | 21 | 23,7 |
| 30 | 25,8 | 20 | 25 |

Amb els resultats obtinguts es fa una comparativa d'errors similar a l'anterior i un estudi de sensibilitat, però aquest cop es calcula l'error respecte l'abast calculat amb el tractament d'imatges visibles i respecte a la primera simulació per a veure com afecten les modificacions fetes. (Taules 20,21 i 22)

Taula 20- Valors del Test 1

| T(s) | Comparació amb abast visible | | | Comparació amb Cas Base | | |
|------|------------------------------|--------------------|----------------------|-------------------------|--------------------|----------------------|
| | Eabs x (m) | % E _R X | % ∑ E _R X | Eabs x (m) | % E _R X | % ∑ E _R X |
| 5 | 0,5 | 9% | 9% | 0,2 | 4% | 4% |
| 10 | 1 | 8% | 9% | 1 | 8% | 7% |
| 15 | -1 | -6% | 1% | 0,2 | 1% | 4% |
| 20 | -3 | -14% | -4% | -0,8 | -4% | 1% |
| 25 | -2 | -9% | -6% | -2 | -9% | -2% |
| 30 | -5 | -20% | -9% | -5,8 | -22% | -7% |

Taula 21- Valors Test 2

| T(s) | Comparació amb abast visible | | | Comparació amb Cas Base | | |
|------|------------------------------|--------------------|----------------------|-------------------------|--------------------|----------------------|
| | Eabs x (m) | % E _R X | % ∑ E _R X | Eabs x (m) | % E _R X | % ∑ E _R X |
| 5 | 0,4 | 7% | 7% | 0,1 | 2% | 2% |
| 10 | 1,5 | 13% | 11% | 1,5 | 13% | 9% |
| 15 | -0,8 | -4% | 3% | 0,4 | 2% | 6% |
| 20 | -2 | -9% | -2% | 0,2 | 1% | 4% |
| 25 | 0,7 | 3% | 0% | 0,7 | 3% | 4% |
| 30 | 0 | 0% | 0% | -0,8 | -3% | 2% |

Taula 22- Resultats de l'estudi de sensibilitat

| T(s) | Coefficient de sensibilitat | Grau de sensibilitat |
|------|-----------------------------|----------------------|
| 5 | 0,088 | Insensibilitat |
| 10 | 0,208 | Insensibilitat |
| 15 | 0,060 | Insensibilitat |
| 20 | 0,253 | Insensibilitat |
| 25 | 0,587 | Sensibilitat Baixa |
| 30 | 0,969 | Sensibilitat Baixa |

Amb aquests resultats es pot concloure de manera genèrica que la sensibilitat de l'abast del núvol al 25% del LFL és insensible a petites variacions de les variables atmosfèriques, sobretot als primers instants de la dispersió respecte al cas base. Respecte a la comparació amb l'abast visible s'observa

com el test 1 obté un 5% més de $\% \sum E_{RX}$, tot i així es considera poc significatiu donat que es treballa amb grans distàncies; pel que fa al test 2 s'observa com $\% \sum E_{RX}$ disminueix fins al 0% veient una millora del 4%, degut a que en les distàncies finals els valors són molt propers als de l'abast visible.

8 ESTUDI DE SOSTENIBILITAT DEL PROJECTE

En base a les directius exposades al *Real Decreto Legislativa 1/2008, de 11 de Enero*, pel qual es presenta el *Texto refundido de la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos*, es realitza l'estudi de sostenibilitat d'aquest projecte.

8.1 DESCRIPCIÓ GENERAL DEL PROJECTE

La realització d'aquest projecte consisteix en la validació de l'eina FLACS com a sistema per a poder predir de manera fiable l'abast de les fuites de gasos inflamables. Per tant, la realització d'aquest projecte ve condicionat de manera exclusiva per la realització d'aquesta tasca.

8.2 ESTUDI D'ALTERNATIVES

En tractar-se d'un projecte eminentment teòric, es considera que no hi ha solucions alternatives a la seva realització.

8.3 DESCRIPCIÓ DEL MEDI

Aquest projecte s'ha dut a terme íntegrament a les instal·lacions del CERTEC, ubicat al Departament d'enginyeria química de l'ETSEIB, i ha tingut una durada d'uns 6 mesos. Es considera que la seva realització no ha modificat de manera substancial els nivells de qualitat del medi ambient immediat ni dels elements que conformen, incloent-hi el context socioeconòmic.

8.4 IDENTIFICACIÓ I VALORACIÓ DELS IMPACTES SOBRE EL MEDI

En aquest apartat, s'analitzen els diferents impactes potencials que el projecte podria tenir sobre el medi ambient i que poden ser a causa de:

- l'existència del projecte
- l'emissió de contaminants

8.4.1 CRITERIS D'AVALUACIÓ

En primer lloc es present un seguit de definicions tècniques imprescindibles per a la valoració dels impactes ambientals considerats significatius. Aquests termes es refereixen als diferents tipus d'afectes que poden donar lloc els impactes derivats d'un projecte i són:

En funció del tipus d'efecte:

- Efecte positiu: Aquell que és admès com a tal, tant per la comunitat científica com per la població en general, context d'una anàlisi completa dels costos i beneficis genèrics i de les eventualitats externes de l'actuació contemplada.
- Efecte negatiu: Aquell que es tradueix en la pèrdua de valor natural, estètic-cultural paisatgístic, de productivitat ecològica; o en un augment dels perjudicis derivats de la contaminació de l'erosió i altres riscos ambientals en discordança amb l'estructura ecològicageogràfica, el caràcter i la personalitat d'una localitat determinada.

En funció de la incidència de l'efecte:

- Efecte directe: Aquell que té una incidència immediata en algun aspecte mediambiental.
- Efecte indirecte o secundari: Aquell que suposa una incidència immediata respecte a la interdependència o, en general, respecte a la relació d'un sector ambiental amb un altre.

A continuació, s'indiquen les diferents definicions sobre la magnitud de la valoració d'un impacte ambiental potencial que fa referència al seu caràcter de compatibilitat ambiental:

- IA Compatible: Aquell en el qual la recuperació és immediata en finalitzar l'activitat i no requereix de mesures protectores.
- IA Moderat: Aquell en el qual la recuperació no precisa de mesures protectores o correctores intensives, però que per recuperar les condicions inicials requereix un cert temps.
- IA Sever: Aquell en el qual la recuperació de les condicions del medi exigeix l'adequació de mesures protectores o correctores, a més d'un període dilatat de temps.
- IA Crític: Aquell que presenta una magnitud superior al límit acceptable, produint-se una pèrdua permanent de la qualitat de les condicions ambientals, sense possibilitat de recuperació, ni tan sols amb l'adopció de mesures protectores o correctores. A part d'avaluar els impactes concrets de les diferents relacions causa-efecte, han d'ésser valorats respecte l'impacte global del projecte. La

magnitud global del projecte serà positiva si la valoració global és compatible, moderada o severa, mentre que serà negativa si la valoració global és crítica.

8.4.2 IDENTIFICACIÓ D'IMPACTES

A l'hora de realitzar un estudi de sostenibilitat d'un projecte, s'han de considerar les activitats principals que implica la seva realització. En aquest cas, al ésser un projecte teòric, només té sentit parlar d'impactes indirectes com poden ser: el consum d'electricitat, la utilització de material d'oficina.

8.4.3 IMPACTES AMBIENTALS POTENCIALS

En aquest apartat s'analitzen els possibles impactes al medi ambient i a la societat que hagi pogut ocasionar la realització d'aquest projecte. Concretament, es distingeixen tres possibles tipus d'impacte:

- Impacte per l'existència del projecte
- Impacte per l'ús de recursos
- Impacte per emissions

Impacte per l'existència del projecte

Es produeix un impacte positiu per la realització del projecte. La validació de l'eina de manera teòrica permet reduir el número d'experiments necessaris i, en conseqüència, anular els perills derivats de la realització de fuites controlades. A la llarga, tot plegat aportarà un benefici social a nivell de millorar l'anàlisi i prevenció de riscos derivats d'accidents i fuites.

Impacte per l'ús de recursos

Es produeix un impacte directe per l'ús de recursos, bàsicament material d'oficina i com a conseqüència de l'ús dels equips informàtics, condicionament de l'oficina, etc. La gestió de residus es realitza segons s'exposa a la Taula 23 on també s'identifica cada residu generat segons la normativa exigida per l'Agència de Catalana de Residus (Junta de residus, 1999).

Taula 23- Classificació de residus generats.

| Codi | Residu generat | Procés en què es genera | Via de gestió |
|--------|------------------|--|--|
| 200101 | Paper | Material utilitzat en Impressions i anotacions | Contenedor blau de recollida selectiva |
| 080309 | Tinta impressió | Impressió document | Punt de reciclatge especialitzat |
| 200199 | Material oficina | Material utilitzat durant | Contenedor groc de |

l'elaboració del projecte

recollida selectiva

Impacte per emissions

Es pot considerar l'existència d'un impacte de tipus indirecte derivat del consum d'energia elèctrica que suposa l'emissió de gasos de combustió a les centrals tèrmiques. El principal contaminant després és el CO₂, responsable de l'efecte hivernacle. Així doncs, el projecte s'ha desenvolupat al llarg de 9 mesos. Tenint en compte que els primers 4 mesos es realitza una tasca de documentació i recerca, que al llarg de la realització del projecte s'ha disposat d'un ordinador corrent les simulacions i que aquest està obert tots els dies de la setmana i les 24h del dia, el temps de consum energètic és de 10080 hores, de les quals s'aproxima que un 95% del temps els ordinadors estan en repòs i, per tant, el consum és menor. Si es considera que l'ordinador requereix una potència mitjana de 90 W quan està actiu i 5 W, en repòs; l'energia consumida al llarg del projecte és de 93,24 kWh. Finalment, a partir de les dades d'emissió de CO₂ per kWh produït publicades per la Red Eléctrica Española, es determina que s'emet 300 g de CO₂/kWh produït (OCCC, 2013). Si, a caire d'aproximació, es considera que la unitat d'energia produïda és equivalent a la unitat d'energia consumida i, per tant, no hi ha pèrdues en el transport, la massa de CO₂ alliberada per la realització d'aquest projecte és de 28 kg de CO₂.

8.4.4 VALORACIÓ DELS IMPACTES

Tots els impactes derivats d'aquest estudi es poden valorar com a impactes compatibles i, per tant, l'impacte global associat al projecte també, ateses les mesures correctores previstes i que es detallen a continuació.

8.5 MESURES PREVISTES

Les mesures correctores previstes per a minimitzar els impactes ambientals se centren bàsicament en la gestió ambiental dels residus generats (paper, cartutxos de tinta d'impressora, etc.). A més a més, s'intenta minimitzar el consum de fulls de paper utilitzant documents en format electrònic i imprimint a doble cara.

9 COST DEL PROJECTE

A continuació es detallaran les despeses a les que s'ha vist subjecte aquest projecte. Es diferenciaran en dues categories: recursos materials i recursos humans.

9.1 RECURSOS MATERIALS

Els recursos materials consumits durant la realització d'aquest projecte estan associats al treball d'oficina, per tant, els costos deriven del consum de material d'oficina, aigua i llum. Cal destacar que tota l'activitat ha estat desenvolupada a les instal·lacions del CERTEC i que, per tant, s'ha gaudit del material informàtic que disposa aquesta institució. En conseqüència, en referència a aquest aspecte es considera l'amortització dels equips informàtics propietat del CERTEC. Pel que fa al programari emprat, es considera que el cost de les llicències del sistema operatiu i del programari ofimàtic, vénen inclosos dins del cost d'adquisició de l'ordinador. Pel que fa a les llicències del programari específic del treball, GIMP2, és programari lliure i per tant no inclou cap cost addicional. Per altre banda, el simulador emprat –FLACS- és un programari amb llicència privada i per tant té un elevat cost d'adquisició.

9.2 RECURSOS HUMANS

En els costos associats als recursos humans, es contempen bàsicament les hores de dedicació de la persona encarregada del projecte, així com de la persona encarregada de les tasques de direcció i assessorament. Així, s'ha considerat el sou d'un enginyer júnior a un cost de 15€/hora, dedicant-hi 40 hores setmanals durant 15 setmanes. A més a més d'un cost addicional d'uns honoraris estimats de 2 hores setmanals per un valor de 40€/hora per la dedicació a la direcció i assessorament de la doctora en enginyeria industrial.

9.3 COST TOTAL

A continuació es presenta el cost total de les despeses resultants de la realització d'aquest projecte. (Taula 24)

Taula 24-Cost total associat a la realització del projecte

| Concepte | Cost Total |
|---------------------------------|----------------|
| Sou Enginyer júnior | 9.000€ |
| Doctora Enginyera industrial | 1.200€ |
| Material Oficina | 50€ |
| Amortització Equips Informàtics | 500€ |
| Llicència FLACS | 1.000€ |
| Total | 11.750€ |

Per tant, el cost estimat del projecte és de 11.750€

10 CONCLUSIONS

El treball realitzat durant el desenvolupament d'aquest projecte ha permès extreure les següents conclusions:

L'estudi bibliogràfic realitzat durant el treball ha posat de manifest la gran importància dels combustibles tractats durant el treball; sobretot la importància de la seguretat en el seu transport i emmagatzematge.

L'estudi teòric dels diferents models de dispersió de gasos ha permès detectar la varietat de possibilitats per a modelitzar les dispersions de gasos. Tot i així, s'ha vist com els models han anat evolucionant fins als actuals models físics emprats en la modelització CFD i com aquesta ha suposat una gran millora a l'hora d'estudiar escenaris ocorreguts o teòrics.

L'experimentació realitzada per Miralles (2015), ha permès estudiar l'abast d'un núvol de LGP amb el simulador FLACS partint de les dades recollides durant els experiments. Amb el disseny d'una senzilla metodologia per a la determinació de l'abast real del núvol, s'ha estudiat quines variables de simulació permeten predir aquesta dada experimental. Després de realitzar la comparativa de l'abast del núvol real amb l'abast del núvol simulat obtingut a partir de diferents criteris, s'ha observat que l'abast de la isolínia de temperatura de rosada no és un bon indicador de l'abast del núvol visible per aquest tipus de fuga (fuga tipus jet). D'altra banda, s'ha pogut determinar que l'abast del núvol a 1/4 de LFL és coincident amb un error acceptable amb l'abast del núvol visible. A més a més, a partir d'una anàlisi de sensibilitat, s'ha pogut comprovar la robustesa d'aquestes simulacions a petits canvis en les condicions ambientals. Tot i els resultats obtinguts, seria tanmateix necessari validar si el criteri de determinació de l'abast visible del núvol a partir d'1/4 de LFL és també adequat a altres condicions de fuga (velocitats de sortida de gas, substàncies i condicions ambientals diferents a les experimentals)

Aquest projecte posa de manifest la necessitat de seguir validant el simulador FLACS per diferents tipus d'escenaris i diferents característiques de combustible per arribar a l'objectiu final que és la utilització del simulador com a eina predictiva per casos reals.

11 REFERÈNCIES BILIOGRÀFIQUES

US Energy Information Administration, "Annual Energy Outlook 2015", Juny 2015. [ONLINE] Available:

https://www.eia.gov/forecasts/aeo/section_energyconsump.cfm

Miralles, A.; "Quantitative dispersion analysis of leakages of flammable and/or toxic substances on environments with barriers or semi-confined", 2015. [ONLINE] Available:

<https://upcommons.upc.edu/handle/10803/316776>

Villafañé, D.; "Estudio de la dispersión e incendio de nubes inflamables de gas (GNL y GLP)", 2013. [ONLINE] Available:

<https://upcommons.upc.edu/handle/10803/128931>

Behrouz, H.; "Contribution to the study of Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions and their mechanical effects", 2016.

Cook, L.; "LNG will play an increasingly important role in gas market", Febrer 2013. [ONLINE] Available:

<http://www.engineerlive.com/content/14824>

Air Liquide, "Enciclopedia de los gases", 2013. [ONLINE] Available:

<http://encyclopedia.airliquide.com/encyclopedia.asp?GasID=41&LanguageID=9&CountryID=19>

TNO, "Methods for the calculation of Physical Effects", 2005. [ONLINE] Available:

<http://content.publicatiereeksgevaarlijkstoffennl/documents/PGS2/PGS2-1997-v0.1-physical-effects.pdf>

Eurostat, "Gross inland energy consumption by fuel type", 2014. [ONLINE] Available:

<http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=tsdcc320&language=en>

CEE "Center for Energy Economics", "LNG SAFETY AND SECURITY", 2006. [ONLINE] Available:

http://www.beg.utexas.edu/energyecon/lng/documents/CEE_LNG_Safety_and_Security.pdf

CHV-IV International, "Safety History of International LNG Operations", 2012. [ONLINE] Available:

<http://www.chiv.com/assets/documents/Safety%20History%20of%20International%20LNG%20Operations.pdf?/pdfs/Safety%20History%20of%20International%20LNG%20Operations.pdf>

Spicer, T. & Havens, J.; "User's Guide for the DEGADIS 2.1 Dense Gas Dispersion Model", 1989. [ONLINE] Available:

<https://www3.epa.gov/scram001/userg/other/degadis2.pdf>

CFD Online, "CFD-Wiki", 2015. [ONLINE] Available:

http://www.cfd-online.com/Wiki/Main_Page

Brook, P., Chodorowska, N. LPG storage systems, atmospheric vs. pressurized. Foster Wheeler Energy Limited, UK. Gastech, 2005.

Hemmatian B.; Planas E.; Casal J.; "Fire as a primary event of accident domino sequences: The case of BLEVE", 2014.

ANSYS, Inc, " Ansys CFX", 2016. [ONLINE] Available:

<http://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS-CFX>

ANSYS, Inc, " Ansys Fluent", 2016. [ONLINE] Available:

<http://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS-Fluent>

Fluydin, " Fluydin PANACHE- Atmospheric Pollution & Industrial Risk Analysis", 2010. [ONLINE] Available:

<http://www.fluidyn.com/fluidyn/panache>

Gexcon AS, "FLACS Software Overview", 2014. [ONLINE] Available:

<https://www.gexcon.com/flacs-software/article/FLACS-Overview>

Bartelink H.; "A model of dry matter partitioning in trees," Tree Physiol., vol. 18, pp. 91–101., 1998.

Van den Bosch, W.; "Methods for the calculation of physical effects: Yellow Book", 2005. [ONLINE] Available:

<http://content.publicatiereeksgevaarlijkstoffennl/documents/PGS2/PGS2-1997-v0.1-physical-effects.pdf>

Sklavounos, S.; & Rigas, F.; "Validation of turbulence models in heavy gas dispersion over obstacles. Journal of Hazardous Materials(A108), 9-20", 2004.

Havens, J.; & Spicer, T.; "Development of an atmospheric dispersion model for heavier than air gas mixtures. Report CG-D-22-85, vol I , U.S. Coast Guard", 1985.

Hjertager, B. H.; "Computer simulation of turbulent reactive gas dynamics. Modeling, identification and control Journal, 5(4), pp. 211-236", 1985.

Planas-Cuchi, E.; "Explosion of a road tanker containing liquified natural gas. J. Loss Prev. Process Industries 17 (6), 315e321", 2004. [ONLINE]. Available:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950423004000300>

Planas et al.; " Analysis of the boiling liquid", 2014. [ONLINE] Available:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950423015000418>

The High Pressure Gas Safety Institute of Japan (KHK), "Annual Report on Liquified Petroleum Gas (LPG) Related Accidents", 2013. [ONLINE]. Available:

https://www.khk.or.jp/english/dl/annual_report_lpg_2013.pdf

Health and Safety Executive, " PEMEX LPG Terminal, Mexico City, Mexico. 19th November 1984", 2015. [ONLINE] Available:

<http://www.hse.gov.uk/comah/sragtech/casepemex84.htm>

Departament d'Enginyeria Química (EQ), "Tecnologia del Medi Ambient i Sostenibilitat: Tema 3-El Medi Ambient Atmosfèric", 2016. [ONLINE]. Available:

www.atenea.upc.edu

12 ANNEXOS

12.1 Fitxes de Seguretat

BUTÀ

| | | |
|---|--------------|--------------------------------|
| BUTANO (gas licuado) ICSC: 0232 (botella a presión) Noviembre 2003 | | |
| n-Butano | | |
| CAS: | 106-97-8 | C ₄ H ₁₀ |
| RTECS: | EJ4200000 | |
| Masa molecular: 58,1 NU: | | 1011 |
| CE Índice Anexo I: | 601-004-00-0 | |
| CE / EINECS: | 203-448-7 | |

| TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN | PELIGROS AGUDOS /SÍNTOMAS | PREVENCIÓN | PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS |
|------------------------------|--|--|--|
| INCENDIO | Extremadamente inflamable. | Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar. | Cortar el suministro; si no es posible y no existe riesgo para el entorno próximo, dejar que el incendio se extinga por sí mismo; en otros casos apagar con polvo, dióxido de carbono. |
| EXPLOSIÓN | Las mezclas gas/aire son explosivas. | Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. Evitar la generación de cargas electrostáticas (p. ej., mediante conexión a tierra) si aparece en estado líquido. Utilícense herramientas | En caso de incendio: mantener fría la botella rociando con agua. Combatir el incendio desde un lugar protegido. |
| EXPOSICIÓN | | | |
| Inhalación | Somnolencia. Pérdida del conocimiento. | Usar sistema cerrado o ventilación. | Aire limpio, reposo. Respiración artificial si estuviera indicada. Proporcionar asistencia médica. |
| Piel | EN CONTACTO CON LÍQUIDO: CONGELACIÓN. | Guantes aislantes del frío. Traje de protección. | EN CASO DE CONGELACIÓN: aclarar con agua abundante, NO quitar la ropa. Proporcionar asistencia médica. |







| | | | |
|--|--|---|--|
| Ojos | EN CONTACTO CON LÍQUIDO: CONGELACIÓN. | Utilizar pantalla facial. | Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica. |
| Ingestión | | | |
| DERRAMES Y FUGAS | | ENVASADO Y ETIQUETADO | |
| ¡Evacuar la zona de peligro! ¡Consultar a un experto! Protección personal: equipo autónomo de respiración. Ventilar. Eliminar toda fuente de ignición. NO verter NUNCA chorros de agua sobre el líquido. | | Clasificación UE Símbolo: F+; R: 12; S: (2)-9-16; Nota: C Clasificación NU Clasificación de Peligros NU: 2.1 | |
| RESPUESTA DE EMERGENCIA | | ALMACENAMIENTO | |
| Ficha de Emergencia de Transporte: TEC (R)-20S1011. Código NFPA: H1; F4; R0. | | A prueba de incendio. Fresco. | |
| Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © CE, IPCS, 2005 | | | |
| IPCS International Programme on Chemical Safety | | | |
|  | | | |
|  | | | |

| DATOS IMPORTANTES | |
|---|---|
| <p>ESTADO FÍSICO; ASPECTO: GAS INODORO INCOLORO COMPRIMIDO LICUADO.</p> <p>PELIGROS FÍSICOS: El gas es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo; posible ignición en punto distante. El gas es más denso que el aire y puede acumularse en las zonas más bajas produciendo una deficiencia de oxígeno. Como resultado del flujo, agitación, etc., se pueden generar cargas electrostáticas.</p> <p>PELIGROS QUÍMICOS:</p> <p>LÍMITES DE EXPOSICIÓN: TLV: 1000 ppm como STEL (ACGIH 2013). MAK: 1000 ppm, 2400 mg/m³; Categoría de limitación de pico: II(4); Riesgo para el embarazo: grupo D; (DFG 2006).</p> | <p>VÍAS DE EXPOSICIÓN: La sustancia se puede absorber por inhalación.</p> <p>RIESGO DE INHALACIÓN: Al producirse pérdidas en zonas confinadas, esta sustancia puede originar asfixia por disminución del contenido de oxígeno en el aire.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN: La evaporación rápida del líquido puede producir congelación. La sustancia puede afectar al sistema nervioso central.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN PROLONGADA O REPETIDA:</p> |

| PROPIEDADES FÍSICAS | |
|--|--|
| Punto de ebullición: -0.5°C Punto de fusión: -138°C Densidad relativa (agua = 1): 0.6 Solubilidad en agua, g/100ml a 20°C: 0.0061 Presión de vapor, kPa a 21.1°C: 213.7 | Densidad relativa de vapor (aire = 1): 2.1 Punto de inflamación: -60°C Temperatura de autoignición: 365°C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 1.8-8.4 Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: 2.89 |
| DATOS AMBIENTALES | |
| NOTAS | |
| <p>Comprobar el contenido de oxígeno antes de entrar en la zona.</p> <p>Con el fin de evitar la fuga de gas en estado líquido, girar la botella que tenga un escape manteniendo arriba el punto de escape. La información excepto propiedades físicas también puede aplicarse para el Isobutano (CAS 75-28-5).</p> <p>Altas concentraciones en el aire producen una deficiencia de oxígeno con riesgo de pérdida de conocimiento o muerte.</p> | |
| INFORMACIÓN ADICIONAL | |
| <p>Límites de exposición profesional</p> <p>(INSHT 2011): VLA-ED: 1000 ppm</p> | |

METÀ

| METANO | | | |
|---|---------------------------------------|--|---|
| | | | ICSC: 0291 Febrero 2000 |
| CAS: | 74-82-8 | Hidruro de metilo | |
| RTECS: | PA1490000 | CH₄ | |
| NU: | 1971 | Masa molecular: 16.0 | |
| CE Índice Anexo I: | 601-001-00-4 | | |
| CE / EINECS: | 200-812-7 | | |
| TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN | PELIGROS AGUDOS / SÍNTOMAS | PREVENCIÓN | PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS |
| INCENDIO | Extremadamente inflamable. | Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar. | Cortar el suministro; si no es posible y no existe riesgo para el entorno próximo, dejar que el incendio se extinga por sí mismo; en otros casos apagar con agua pulverizada, polvo seco, dióxido de carbono. |
| EXPLOSIÓN | Las mezclas gas/aire son explosivas. | Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. Utilícense herramientas manuales no generadoras | En caso de incendio: mantener fría la botella rociando con agua. Combatir el incendio desde un lugar protegido. |
| EXPOSICIÓN | | | |
| Inhalación | Asfixia. Ver Notas. | Ventilación. A altas concentraciones protección respiratoria. | Aire limpio, reposo. Respiración artificial si estuviera indicada. Proporcionar asistencia |
| Piel | EN CONTACTO CON LÍQUIDO: CONGELACIÓN. | Guantes aislantes del frío. | EN CASO DE CONGELACIÓN: aclarar con agua abundante, NO quitar la ropa. Proporcionar asistencia médica. |
| Ojos | EN CONTACTO CON LÍQUIDO: CONGELACIÓN. | Gafas ajustadas de seguridad | Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica |
| Ingestión | | | |
| DERRAMES Y FUGAS | | ENVASADO Y ETIQUETADO | |
| ¡Evacuar la zona de peligro! Consultar a un experto. Ventilar. Eliminar toda fuente de ignición. Protección personal: equipo autónomo de respiración. NO verter NUNCA chorros de agua sobre el líquido. | | Clasificación UE Símbolo: F+ R: 12 S: (2-)9-16-33 Clasificación NU Clasificación de Peligros NU: 2.1 | |

| RESPUESTA DE EMERGENCIA | ALMACENAMIENTO |
|---|--|
| Ficha de Emergencia de Transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-20G1F Código NFPA: H1; F4; R0; | A prueba de incendio. Mantener en lugar fresco. Ventilación a ras del suelo y techo. |
| Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © CE, IPCS, 2005 | |
| IPCS International Programme on Chemical Safety <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center; margin-top: 10px;">     </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center; margin-top: 10px;">   </div> | |

| DATOS IMPORTANTES | |
|---|--|
| ESTADO FÍSICO; ASPECTO Gas licuado o comprimido incoloro e inodoro. PELIGROS FÍSICOS El gas es más ligero que el aire. LÍMITES DE EXPOSICIÓN TLV: (Hidrocarburos Alifáticos Alcanos (C1-C4), gases) 1000 ppm (como TWA) (ACGIH 2005). MAK no establecido. | VÍAS DE EXPOSICIÓN La sustancia se puede absorber por inhalación. RIESGO DE INHALACIÓN Al producirse pérdidas en zonas confinadas, este gas puede originar asfixia por disminución del contenido de oxígeno en el aire. EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN La evaporación rápida del líquido puede producir congelación. |
| PROPIEDADES FÍSICAS | |
| Punto de ebullición: -161°C Punto de fusión: -183°C Solubilidad en agua, ml/100 ml a 20°C: 3.3 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 0.6 | Punto de inflamación: gas inflamable Temperatura de autoignición: 537°C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 5-15 Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: 1.09 |
| DATOS AMBIENTALES | |
| NOTAS | |
| Densidad del líquido en el punto de ebullición: 0.42 kg/l. Altas concentraciones en el aire producen una deficiencia de oxígeno con riesgo de pérdida de conocimiento o muerte. Comprobar el contenido de oxígeno antes de entrar en la zona. Con el fin de evitar la fuga de gas en estado líquido, girar la botella que tenga un escape manteniendo arriba el punto de escape. Una vez utilizado para la soldadura, cerrar la válvula; verificar regularmente el estado de la tubería, etc., y comprobar si existen escapes utilizando agua y jabón. Las medidas mencionadas en la sección PREVENCIÓN son aplicables a la producción, llenado de botellas y almacenamiento del gas. Otro número NU: 1972 (líquido refrigerado), | |
| INFORMACIÓN ADICIONAL | |
| Límites de exposición profesional (INSHT 2012): VLA-ED: (como Hidrocarburos alifáticos alcanos (C1-C4) y sus mezclas, gases) 1000 ppm | |

PROPÀ

| PROPANO (licuado) (botella a presión) | | | ICSC: 0319 | |
|--|--|--|---|------------------|
| | | | Noviembre 2003 | |
| TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN | PELIGROS AGUDOS/ SÍNTOMAS | PREVENCIÓN | PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS | AUXILIOS/ CONTRA |
| INCENDIO | Extremadamente inflamable. | Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar. | Cortar el suministro; si no es posible y no existe riesgo para el entorno próximo, dejar que el incendio se extinga por sí mismo; en otros casos apagar con agua pulverizada, polvo seco, dióxido | |
| EXPLOSIÓN | Las mezclas gas/aire son explosivas. | Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. Evitar la generación de cargas electrostáticas (p. ej., mediante conexión a tierra) si aparece en estado líquido. Utilídense herramientas manuales no | En caso de incendio: mantener fría la botella rociando con agua. Combatir el incendio desde un lugar protegido. | |
| EXPOSICIÓN | | | | |
| Inhalación | Somnolencia. Pérdida del conocimiento. | Usar sistema cerrado o ventilación. | Aire limpio, reposo. Respiración artificial si estuviera indicada. Proporcionar asistencia médica. | |
| Piel | EN CONTACTO CON LÍQUIDO: CONGELACIÓN. | Guantes aislantes del frío. Traje de protección. | EN CASO DE CONGELACIÓN: aclarar con agua abundante, NO quitar la ropa. Proporcionar asistencia médica. | |
| Ojos | EN CONTACTO CON LÍQUIDO: CONGELACIÓN. | Utilizar pantalla facial. | Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica. | |
| Ingestión | | | | |

| | |
|---|---|
| DERRAMES Y FUGAS | ENVASADO Y ETIQUETADO |
| ¡Evacuar la zona de peligro! Consultar a un experto. Ventilar. Eliminar toda fuente de ignición. Protección personal: equipo autónomo de respiración. NO verter NUNCA chorros de agua sobre el líquido. | Clasificación UE Símbolo: F+; R: 12; S: (2)-9-16 Clasificación NU Clasificación de Peligros NU: 2.1 |
| RESPUESTA DE EMERGENCIA | ALMACENAMIENTO |
| Ficha de Emergencia de Transporte: TEC (R)-20S1011. Código NFPA: H1;F4;R0. | A prueba de incendio. Fresco. |
| Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © CE, IPCS, 2005 | |
| IPCS International Programme on Chemical Safety <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center; margin-top: 10px;">     </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center; margin-top: 10px;">   </div> | |
| DATOS IMPORTANTES | |
| ESTADO FÍSICO; ASPECTO: GAS INODORO INCOLORO COMPRIMIDO LICUADO. PELIGROS FÍSICOS: El gas es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo; posible ignición en punto distante. El gas es más denso que el aire y puede acumularse en las zonas más bajas produciendo una deficiencia de oxígeno. Como resultado del flujo, agitación, etc., se pueden generar cargas electrostáticas. PELIGROS QUÍMICOS: LÍMITES DE EXPOSICIÓN: MAK: 1000 ppm, 1800 mg/m ³ ; Categoría de limitación de pico: II(4); Riesgo para el embarazo: grupo D; (DFG 2006). | VÍAS DE EXPOSICIÓN: La sustancia se puede absorber por inhalación. RIESGO DE INHALACIÓN: Al producirse pérdidas en zonas confinadas, esta sustancia puede originar asfixia por disminución del contenido de oxígeno en el aire. EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN: La evaporación rápida del líquido puede producir congelación. La sustancia puede afectar al sistema nervioso central. EFFECTOS DE EXPOSICIÓN PROLONGADA O REPETIDA: |
| PROPIEDADES FÍSICAS | |
| Punto de ebullición: -42°C Punto de fusión: -189.7°C Densidad relativa (agua = 1): 0.5 Solubilidad en agua, g/100ml a 20°C: 0.007 Presión de vapor, kPa a 20°C: 840 | Densidad relativa de vapor (aire = 1): 1.6 Punto de inflamación: -104°C Temperatura de autoignición: 450°C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 2.1-9.5 Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: 2.36 |
| DATOS AMBIENTALES | |

NOTAS

Comprobar el contenido de oxígeno antes de entrar en la zona.

Con el fin de evitar la fuga de gas en estado líquido, girar la botella que tenga un escape manteniendo arriba el punto de escape. Altas concentraciones en el aire producen una deficiencia de oxígeno con riesgo de pérdida de conocimiento o muerte.

INFORMACIÓN ADICIONAL

Límites de exposición profesional (INSHT 2011):

VLA-ED: 1000 ppm

12.2 Perfils de dispersió a FLACS als diferents instants de temps

12.2.1 Perfils de temperatura de rosada

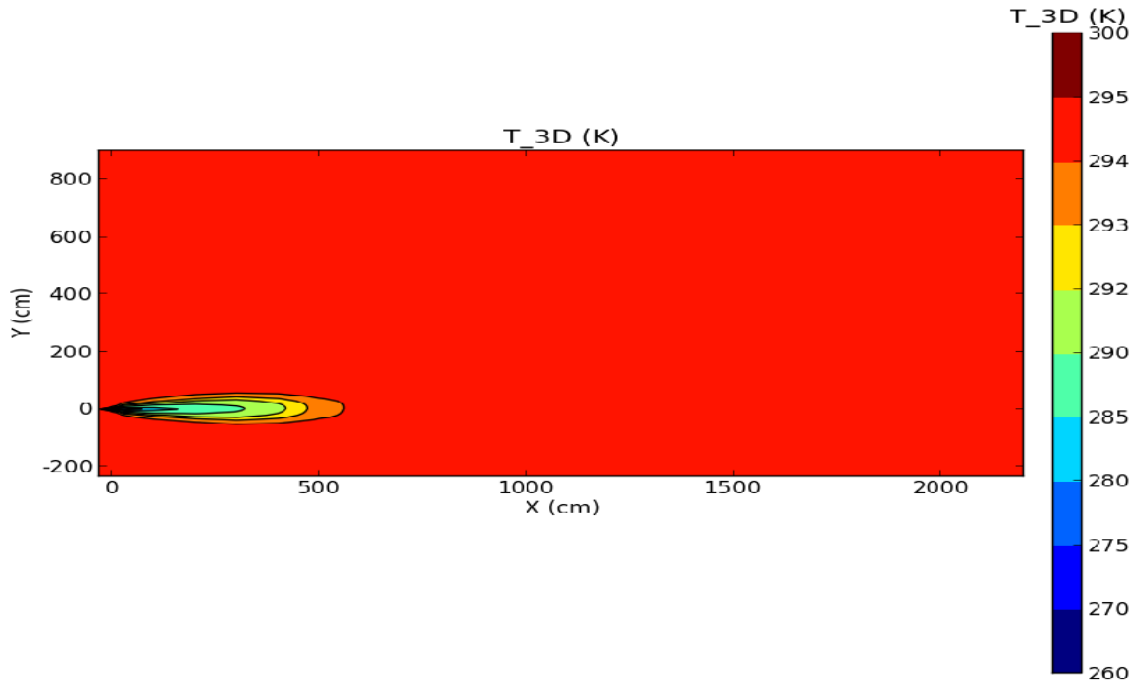


Figura A.1. Perfil de temperatures del núvol en el pla X-Y en l'instant 5 s.

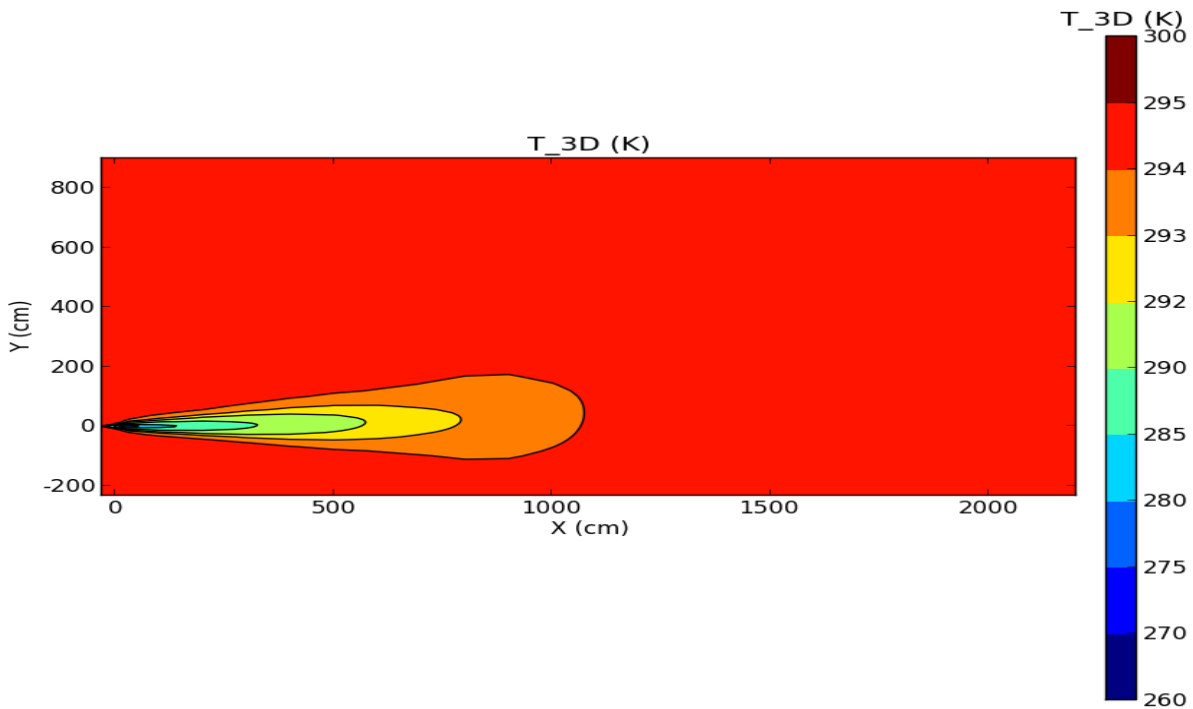


Figura A.2. Perfil de temperatures del núvol en el pla X-Y en l'instant 10 s.

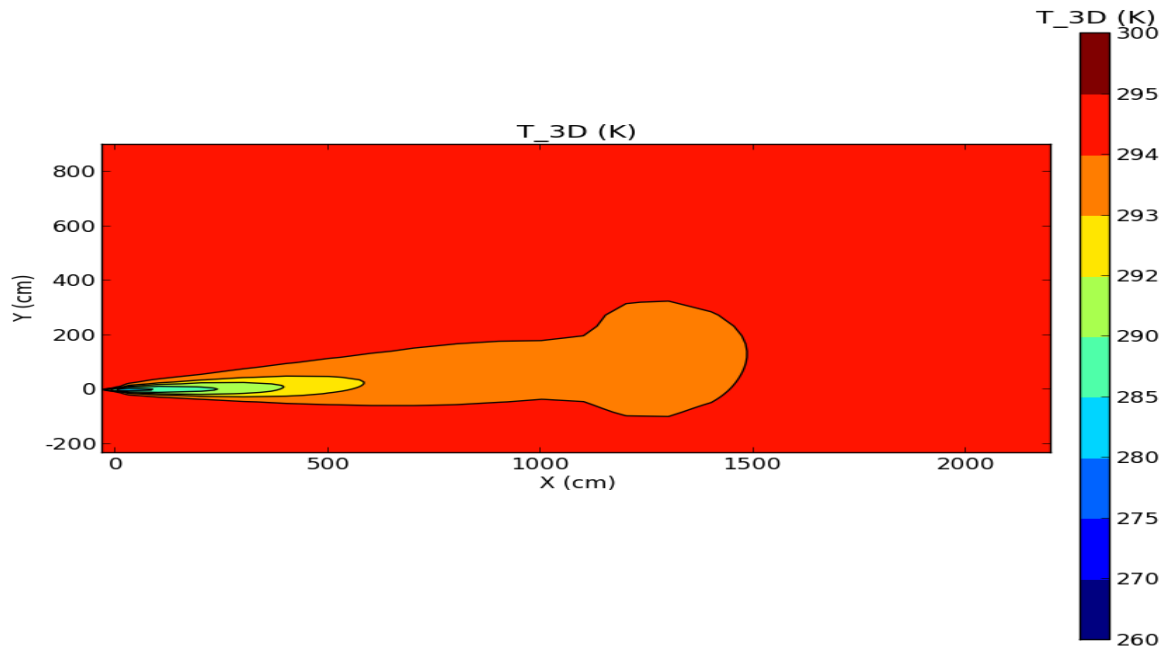


Figura A.3. Perfil de temperatures del núvol en el pla X-Y en l'instant 15 s.

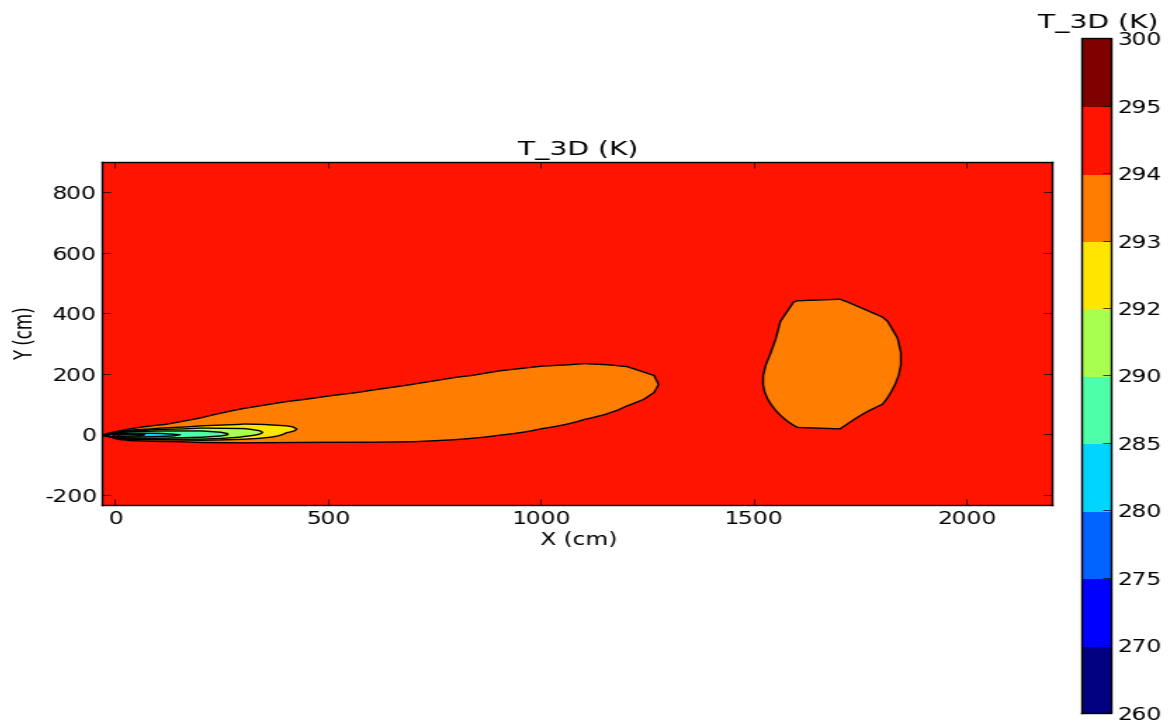


Figura A.4. Perfil de temperatures del núvol en el pla X-Y en l'instant 20s.

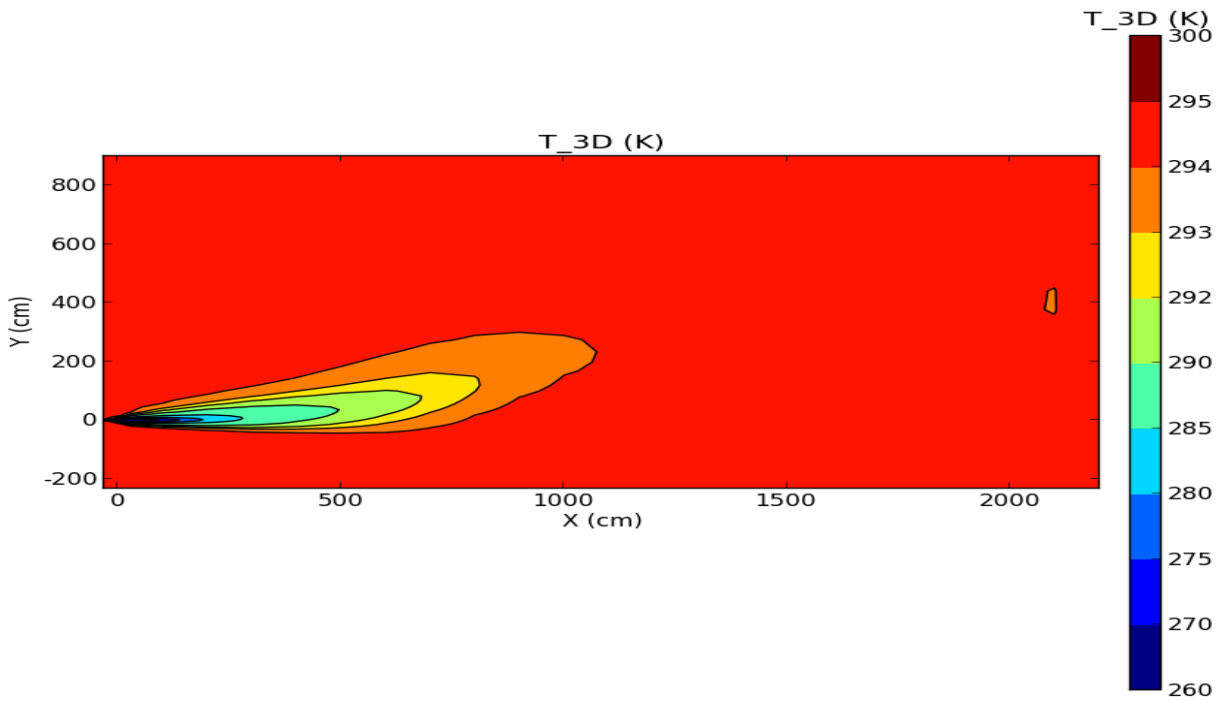


Figura A.5. Perfil de temperatures del núvol en el pla X-Y en l' instant 25s.

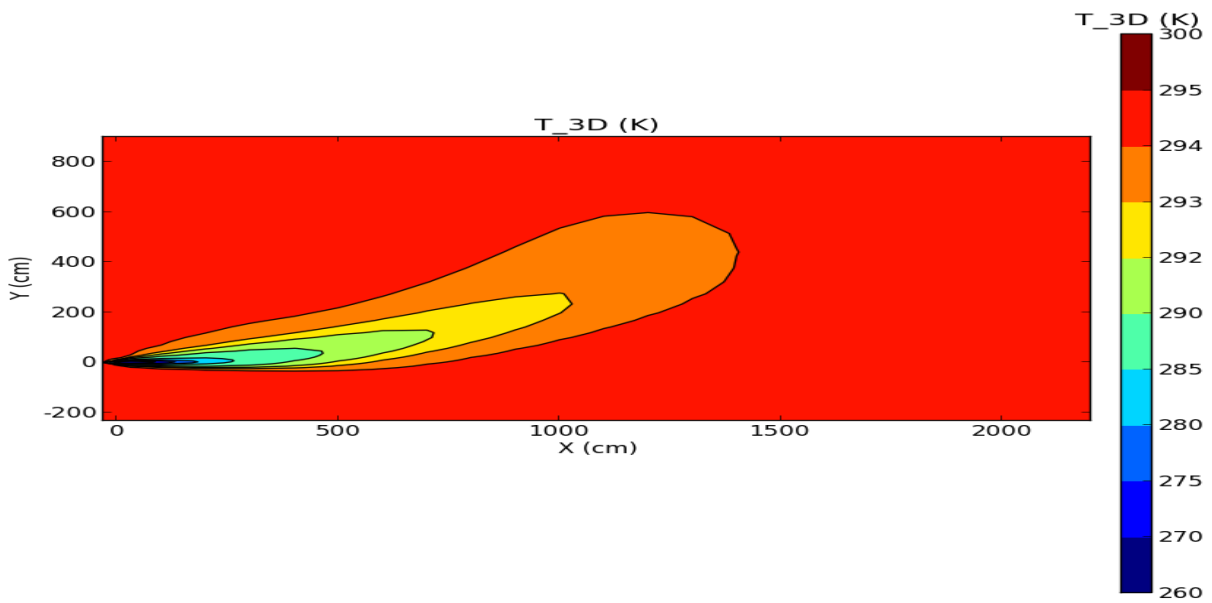


Figura A.6. Perfil de temperatures del núvol en el pla X-Y en l' instant 30s

12.2.2 Perfils de LFL

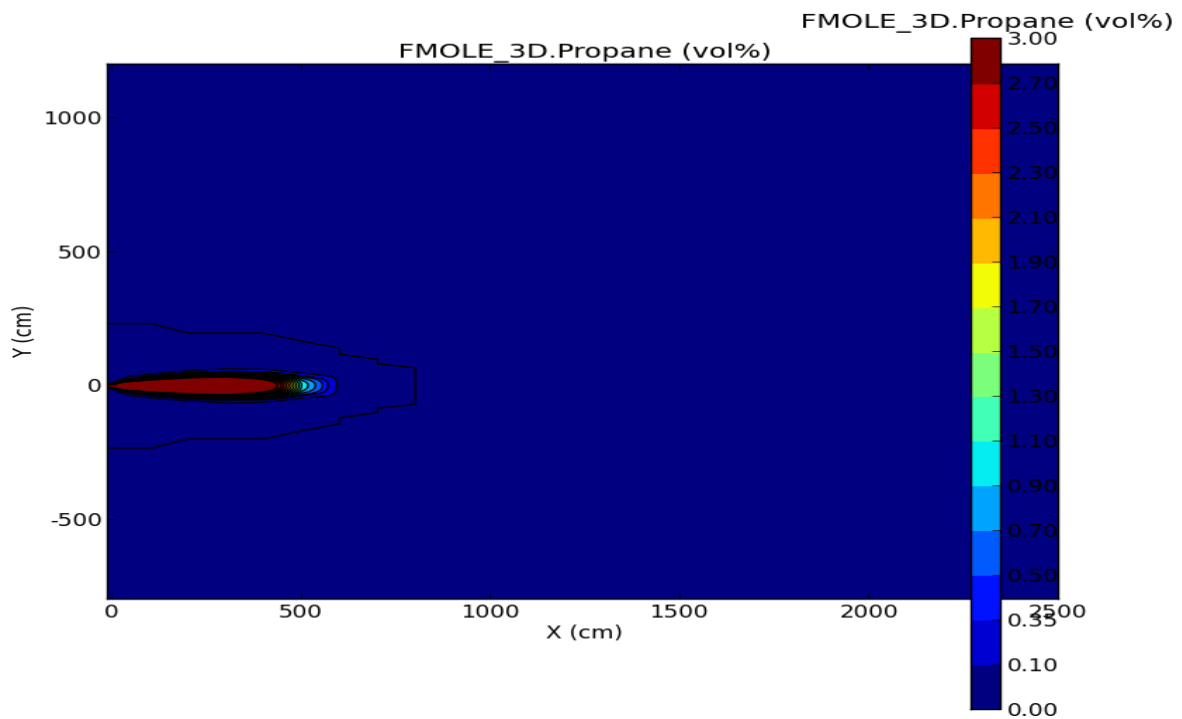


Figura A.7. Perfils de dispersió del núvol en el pla X-Y per a la Fracció molar a l' instant 5 s.

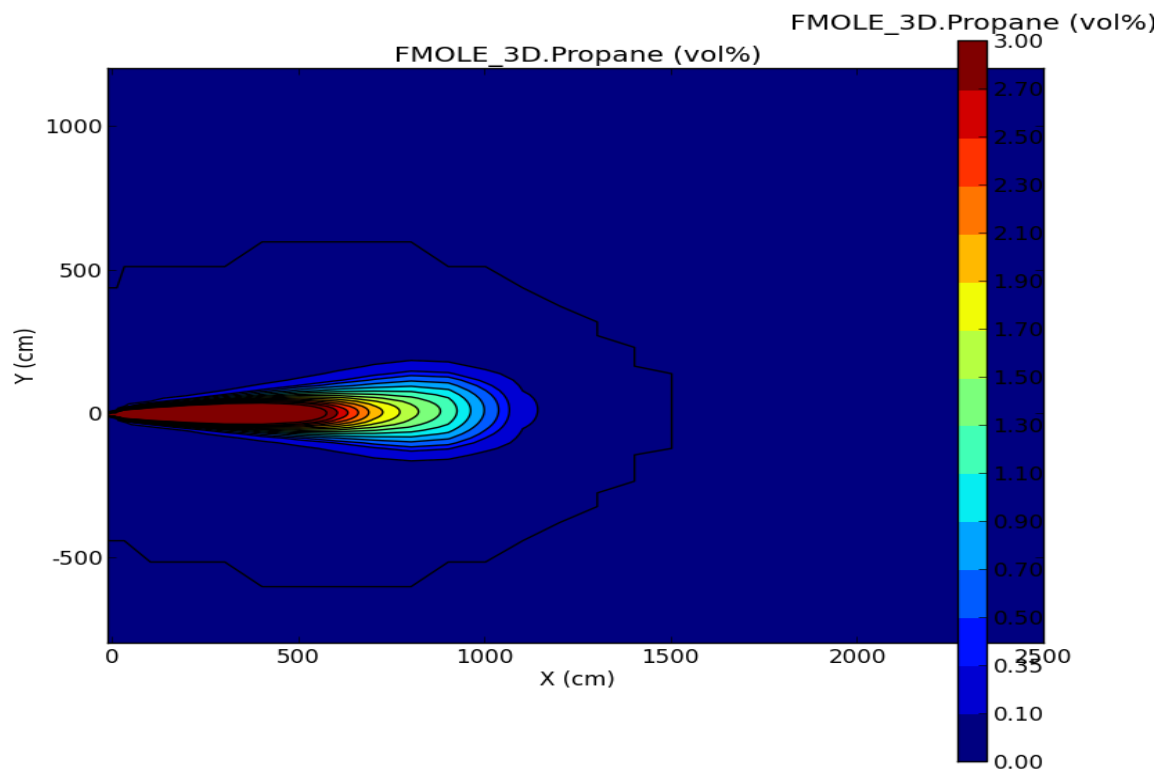


Figura A.8. Perfils de dispersió del núvol en el pla X-Y per a la Fracció molar a l' instant 10 s.

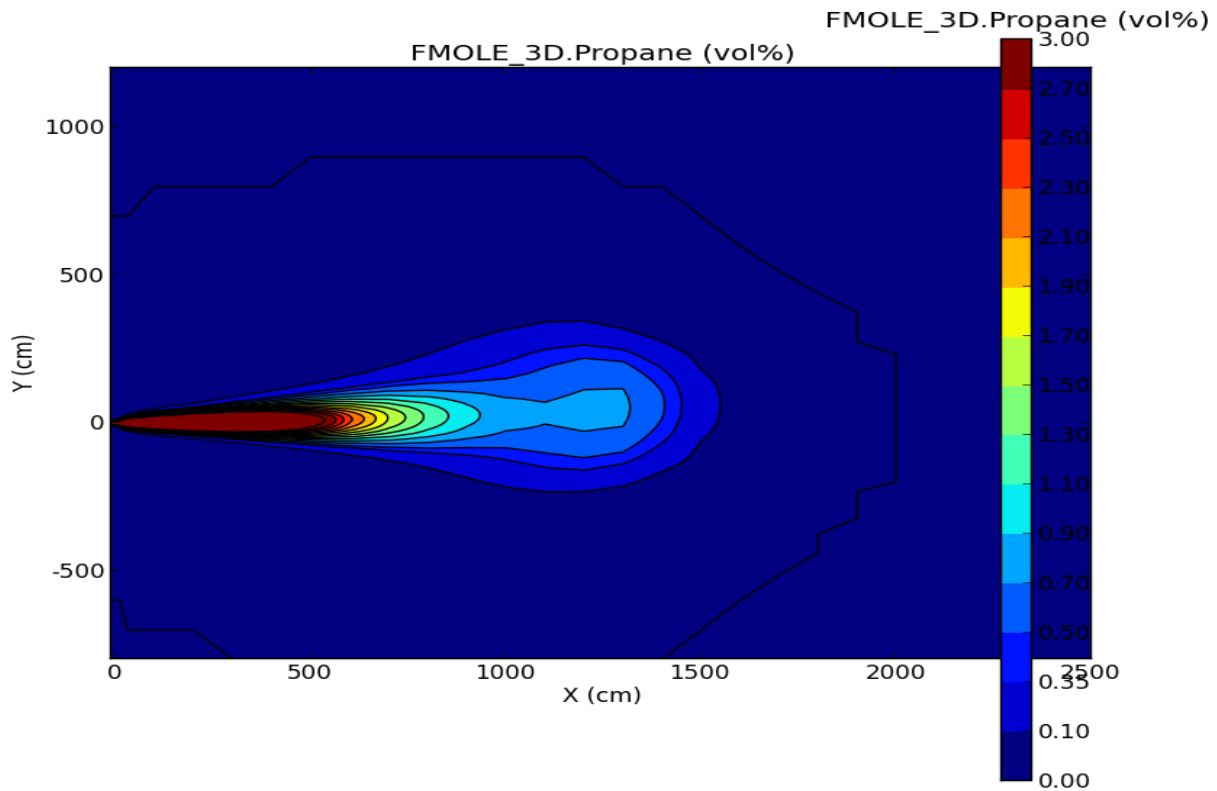


Figura A.9. Perfils de dispersió del núvol en el pla X-Y per a la Fracció molar a l' instant 15 s.

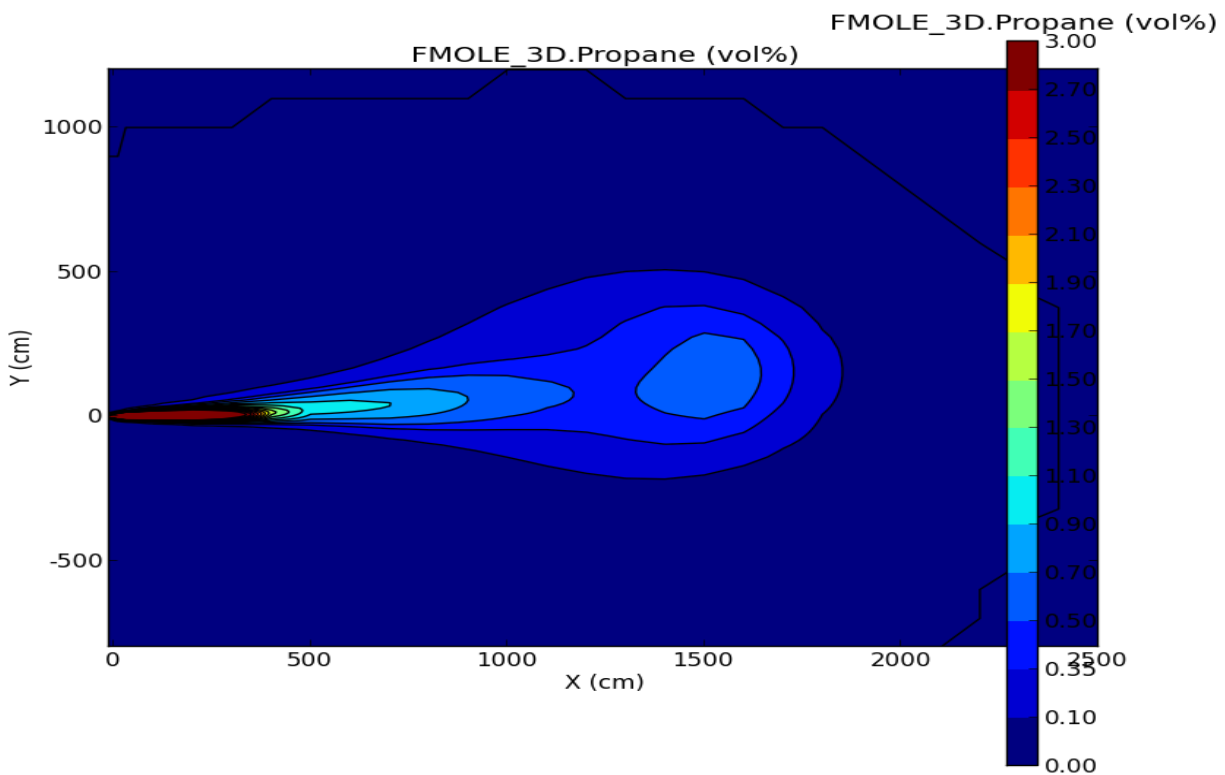


Figura A.10. Perfils de dispersió del núvol en el pla X-Y per a la Fracció molar a l' instant 20 s.

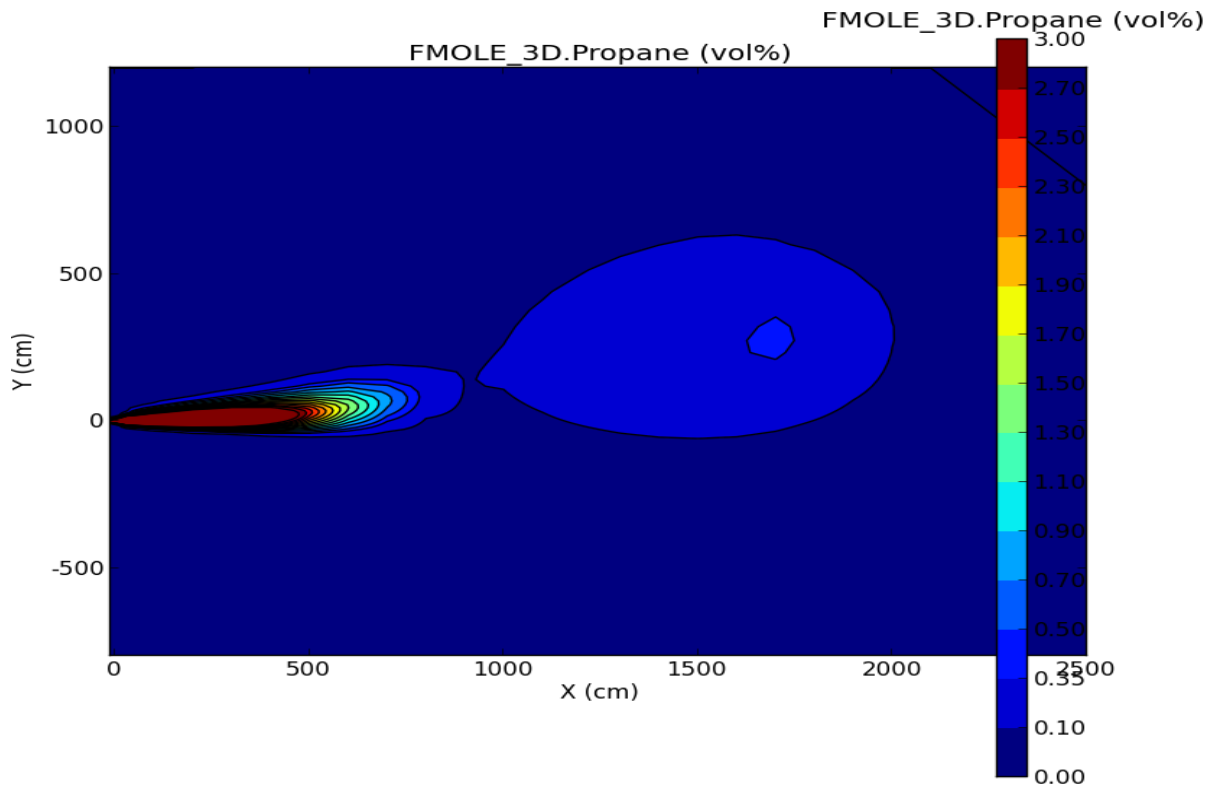


Figura A.11. Perfils de dispersió del núvol en el pla X-Y per a la Fracció molar a l'instant 25 s.

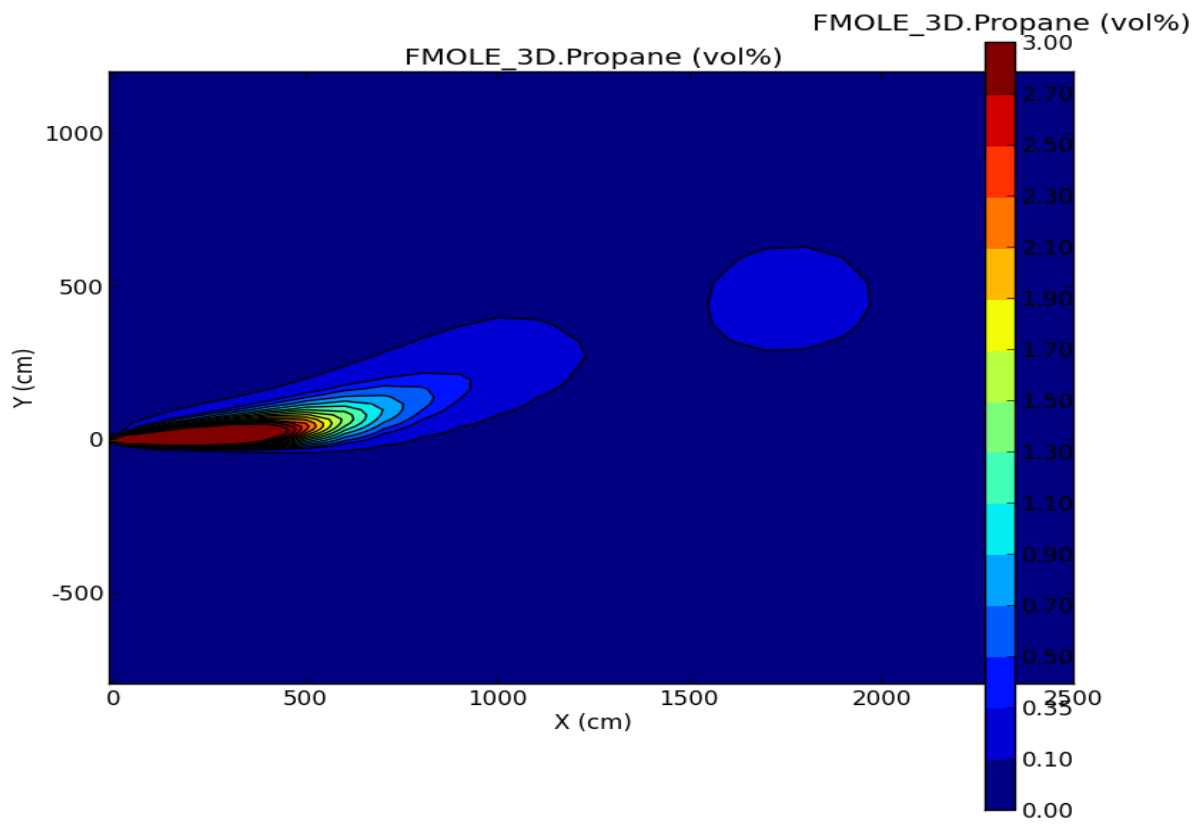


Figura A.12. Perfils de dispersió del núvol en el pla X-Y per a la Fracció molar a l'instant 30 s.

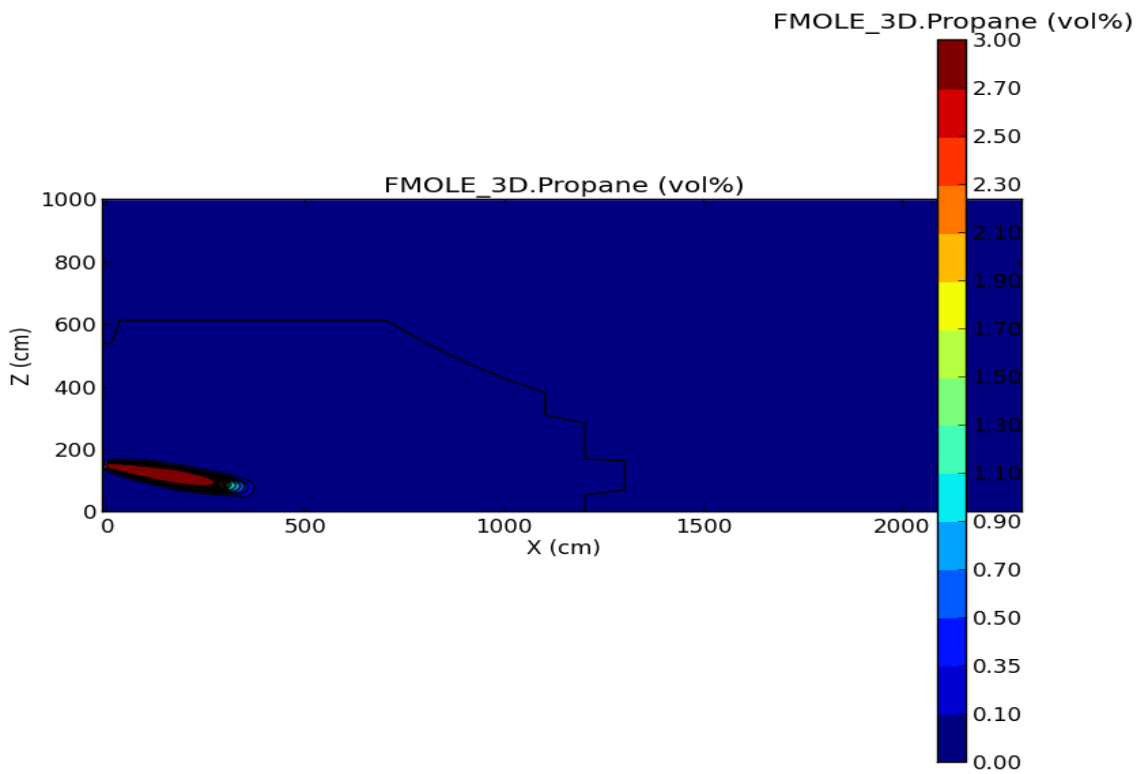


Figura A.13. Perfils de dispersió del núvol en el pla X-Z per a la Fracció molar a l' instant 5 s.

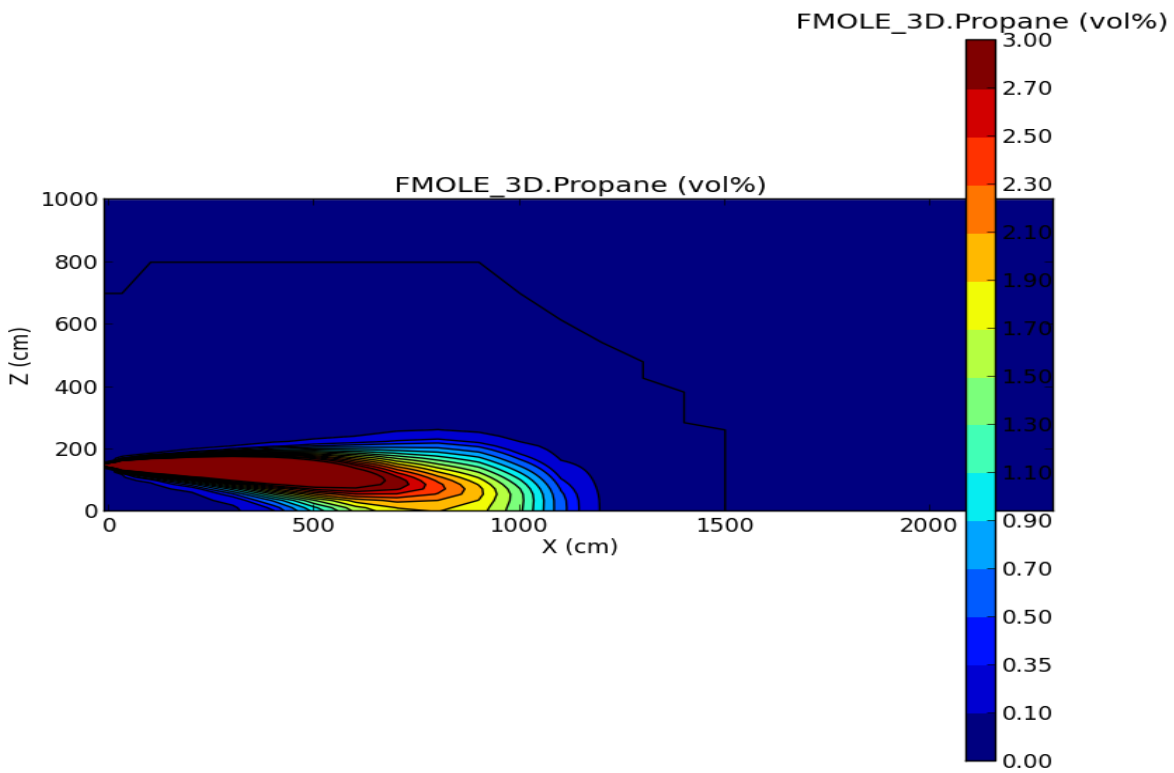


Figura A.14. Perfils de dispersió del núvol en el pla X-Z per a la Fracció molar a l' instant 10 s.

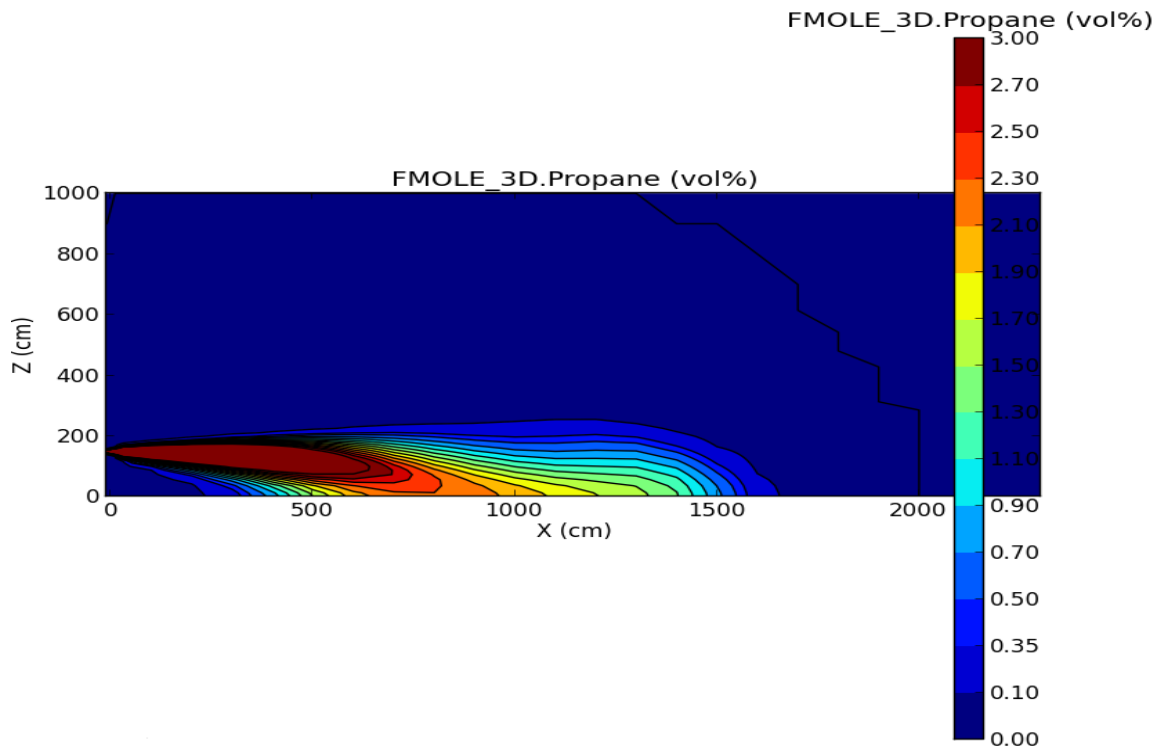


Figura A.15. Perfils de dispersió del núvol en el pla X-Z per a la Fracció molar a l'instant 15 s.

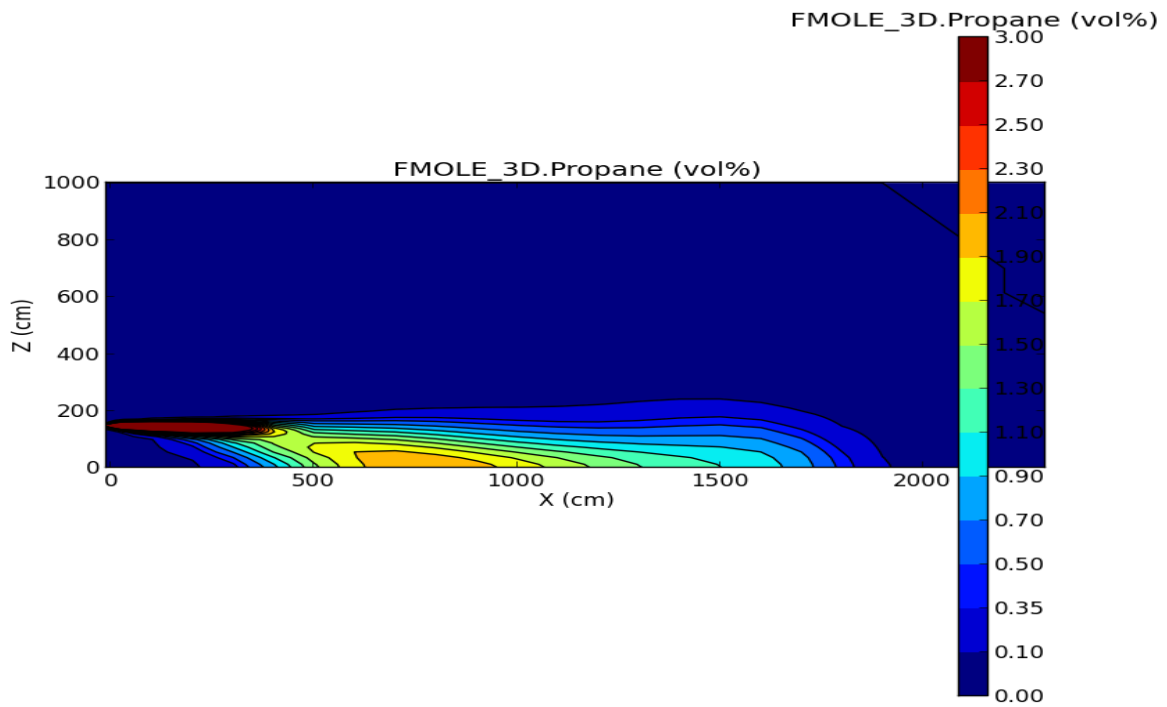


Figura A.16. Perfils de dispersió del núvol en el pla X-Z per a la Fracció molar a l'instant 20 s.

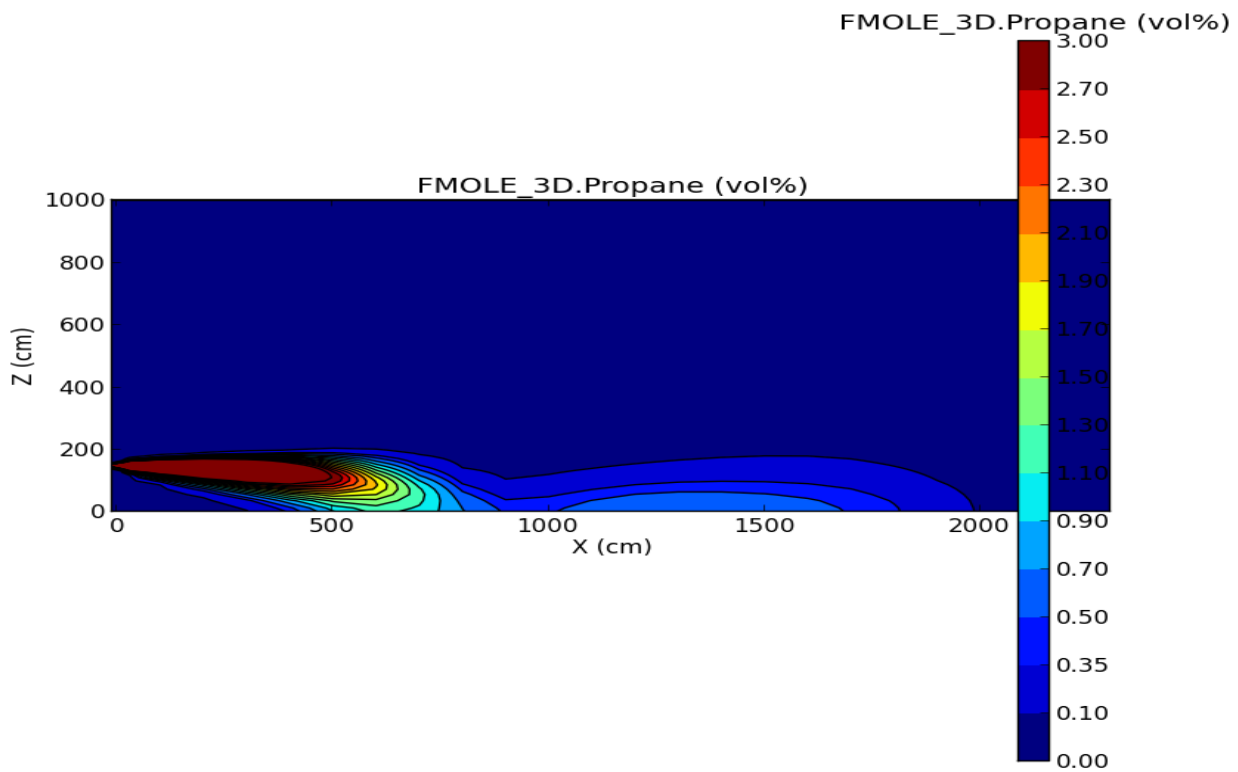


Figura A.17. Perfils de dispersió del núvol en el pla X-Z per a la Fracció molar a l' instant 25 s.

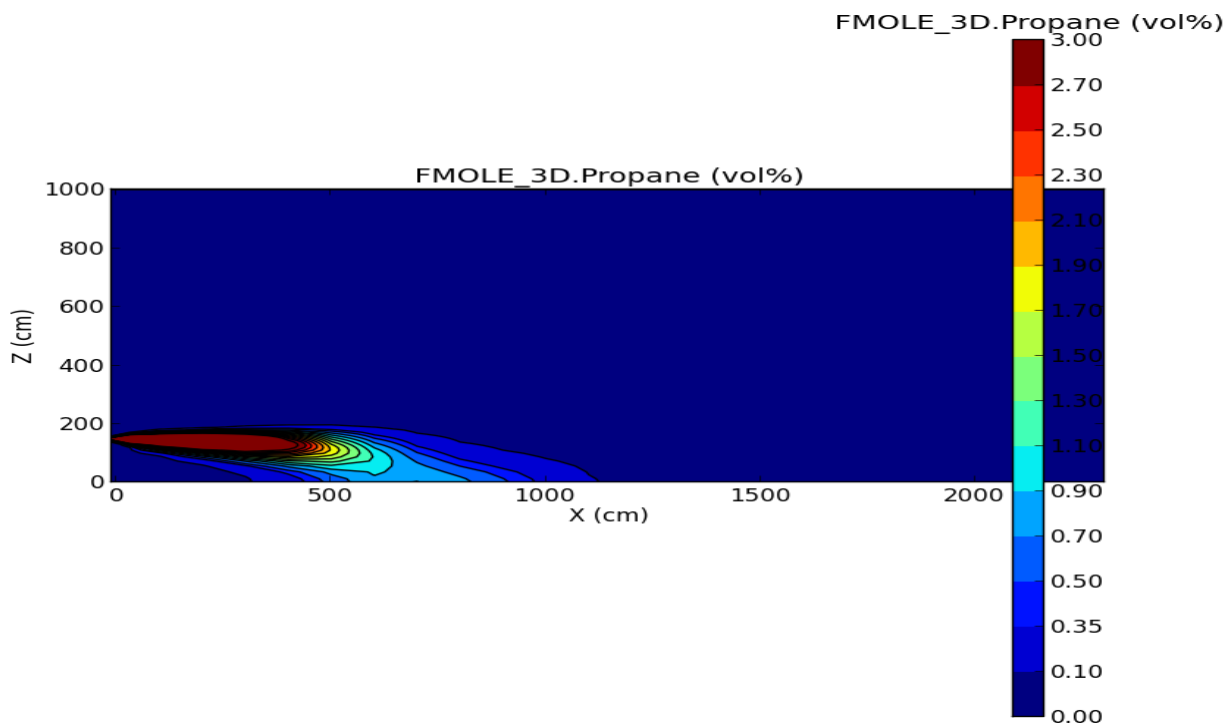


Figura A.18. Perfils de dispersió del núvol en el pla X-Z per a la Fracció molar a l' instant 30 s.