UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria Química

ANÀLISI DE RISC DE PIPELINES

Memòria i Annexos

Autor: Miquel Giménez Mota
Director: Joaquim Casal

Convocatòria: Maig 2018

Resum

A dia d'avui l'ús de pipelines es el més freqüent i usat en tot el món, ja que es un sistema econòmic amb un gran potencial per transportar molt producte en poc temps. Dins d'aquest sistema trobem el transport d'hidrocarburs, un ample recurs amb certes limitacions.

Encara que es tracti d'un sistema de transport molt segur, es evident que la seguretat es el més important, així doncs s'aplica l'Anàlisi Quantitatiu de Riscos (AQR), un mètode molt usat en la prevenció de mercaderies perilloses en l'industria i una de les seves aplicacions son les Pipelines.

L'AQR es una eina excepcional per identificar els riscos associats al transport per canonada d'hidrocarburs, ja que són substancies potencialment inflamables.

Aquest projecte doncs, es basa en l'aplicació del mètode per una fuita de gas liquat per tal de minimitzar riscos en l'hipotètic cas.

Primerament s'analitza la situació de les Pipelines arreu del món, l'accidentalitat de les mateixes; després es posa en situació a nivell teòric sobre la modelització matemàtica i a continuació es defineix un cas hipotètic i s'analitza.

Resumen

A día de hoy el uso de pipelines es el más frecuente y usado en todo el mundo, ya que es un sistema económico con un gran potencial para transportar mucho producto en poco tiempo. Dentro de este sistema encontramos el transporte de hidrocarburos, un ancho recurso con ciertas limitaciones.

Aunque se trate de un sistema de transporte muy seguro, es evidente que la seguridad es lo más importante, así pues se aplica el Análisis Cuantitativo de Riesgos (ACR), un método muy usado en la prevención de mercancías peligrosas en el 'industria y una de sus aplicaciones son las Pipelines.

El ACR es una herramienta excepcional para identificar los riesgos asociados al transporte por tubería de hidrocarburos, ya que son sustancias potencialmente inflamables.

Este proyecto pues, se basa en la aplicación del método por un escape de gas licuado para minimizar riesgos en el hipotético caso.

Primeramente se analiza la situación de las Pipelines todo el mundo, la accidentalidad de las mismas; después se pone en situación a nivel teórico sobre la modelización matemática y después se define un caso hipotético y se analiza.

Abstract

Nowadays the use of pipelines is the most frequent and used in the whole world, since it is an economic system with great potential to transport a lot of product in a short time. Within this system we find the transport of hydrocarbons, a wide resource with certain limitations.

Although it is a very safe transport system, it is clear that security is the most important, so the Quantitative Risk Analysis (AQR) is applied, a method widely used in the prevention of dangerous goods in the The industry and one of its applications are Pipelines.

The AQR is an exceptional tool to identify the risks associated with transport by pipeline of hydrocarbons, as they are potentially flammable substances.

This project is based on the application of the method for leakage of liquefied gas in order to minimize risks in the hypothetical case.

Firstly, the situation of the Pipelines around the world is analyzed, their accidents; then it is put to a theoretical level on the mathematical modeling and then a hypothetical case is defined and analyzed.

Agraïments

Agrair el projecte al tutor del treball per la coordinació i orientació del projecte.
A l'empresa Tradebe Port Services per l'ajuda de material i instruir en el dia a dia d'una planta on es treballa amb Pipelines

Índex

El següent índex es genera i s'actualitza automàticament amb l'opció "*actualizar campos*" que surt quan es prem el botó dret del ratolí a sobre d'ell. Feu que l'índex s'inicïi en una pàgina imparell.

RESUM I

RESUMEN II

ABSTRACT III

AGRAÏMENTS IV

1. INTRODUCCIÓ 9

1.1. Abast del treball 9

2. TRANSPORT D'HIDROCARBURS 10

2.1. Pipelines. 10

2.2. Vaixell 11

2.3. Camions cisterna 12

2.4. Ferrocarril 12

3. IMPORTÀNCIA DEL TRANSPORT PER CANONADA. 13

3.1. L'ús de Pipelines a nivell mundial 13

3.1.1. Vista general de la construcció 13

3.1.2. Amèrica del Nord 14

3.1.3. Regió Àsia 15

3.1.4. Austràlia 16

3.1.5. Països d'Europa de l'Est 16

3.1.6. Àfrica 17

3.1.7. Europa occidental / UE 18

3.1.8. Orient Mitjà 20

3.1.9. Sud i Centreamèrica / Carib 20

4. ACCIDENTS EN PIPELINES 21

4.1. Dades estadístiques d'accidents 21

4.2. Exemples d'accidents 26

4.2.1. Accident per factor humà: Foc a Baton Rouge 26

4.2.2. Accident sobre persones: L'accident a Ghislenghien, Bèlgica 28

4.2.3. Accident sobre el medi ambient: Fuita de Cru a Israel 29

5. MODELITZACIÓ DELS ACCIDENTS ____ 31

5.1. Explosions de núvol de vapor ... 32

5.1.1. Característiques i modelització matemàtica d'una VCE ... 33

5.1.2. Detonació ... 35

5.1.3. Deflagració ... 35

5.2. Càlcul de la sobrepressió. Mètode de TNT equivalent ... 36

5.3. Flamarada (Flash Fire) ... 38

5.3.1. Modelització i càlcul ... 39

5.3.2. Tamany de la flamarada ... 40

5.3.3. Velocitat de la flamarada ... 41

5.3.4. Intensitat de la radiació tèrmica ... 42

5.3.5. Pool fire i Jetfire ... 42

6. ANÀLISI DE RISC QUANTITATIU EN PIPELINES ____ 49

6.1. Metodologia de anàlisis ... 52

6.1.1. Identificació d'escenaris accidentals ... 54

6.1.2. Estimació de la freqüència ... 54

6.1.3. Estimació del risc individual i social ... 56

7. ANÀLISIS DE CONSEQÜÈNCIES: MODELS DE VULNERABILITAT ____ 59

7.1. Anàlisi probit ... 59

7.1.1. Vulnerabilitat a la radiació tèrmica ... 61

8. APLICACIÓ DE L'ANÀLISI QUANTITATIVA DE RISCOS A UNA CANONADA DE GLP (PROPÀ) ____ 67

8.1. Objectiu ... 67

8.2. Plantejament ... 67

8.2.1. Incident a considerar. ... 67

8.2.2. Característiques de l'emplaçament afectat per l'accident. ... 67

8.2.3. Condicions atmosfèriques ... 69

8.2.4. Característiques del conducte ... 69

8.2.5. Propietats de la substancia implicada ... 70

8.2.6. Probabilitat dels diferents escenaris accidentals en cas d'ignició ... 70

8.2.7. Probabilitat de mort ... 71

8.3. Càlcul de conseqüències ... 72

8.3.1. Estimació de freqüència ... 72

8.3.2. Càlcul de la mortalitat ... 73

8.3.3. Aplicació de l'anàlisi probit ... 74

9. CONCLUSIONS 76

10. ANÀLISI DE L'IMPACTE AMBIENTAL 77

11. ANÀLISI ECONÒMICA 79

BIBLIOGRAFIA 81

ANNEX A FITXA DE SEGURETAT DEL PROPÀ (INSHT) 83

1. Introducció

Aquest treball té com a objectiu l'anàlisi quantitatiu de risc, d'un o mes escenaris, provocat per una fuita en una canonada de transmissió

Primer de tot s'exposa la situació del sistema a nivell mundial comparant amb altres sistemes de transport, la seguretat i els conceptes de risc. Després es fa un desenvolupament temporal de l'ús de Pipelines a nivell continental posant exemples de diverses instal·lacions. Posteriorment, es mostraran varis exemples de accidents representatius ja sigui sobre persones o sobre l'entorn.

Després es modalitza un cas o dos, en base a unes condiciones i es simula gracies al programa ALOHA®; amb tot això es calculen les conseqüències sobre la població mitjançant l'aplicació dels models de vulnerabilitat.

1.1. Abast del treball

L'abast del treball es basa en calcular el risc individual y social sobre la població del nucli urbá que reben les conseqüències de l'accident.

Tot això sense considerar les pèrdues econòmiques i materials.

2. Transport d'hidrocarburs

Des que els hidrocarburs s'extreuen fins el que arriben a les refineries hi ha un dels passos més importants, el transport, tant del petroli en cru com de tots els productes derivats, els quals cadascun presenta unes característiques diferents. Per tant es tria el mètode de transport més adequat.

2.1. Pipelines.

Els primers oleoductes es van construir amb el naixement de la industria del petroli als Estats Units, a partir de 1880. Inicialment nomes s'usaven per transportar el cru des de les estacions de emmagatzematge fins les refineries o ports.

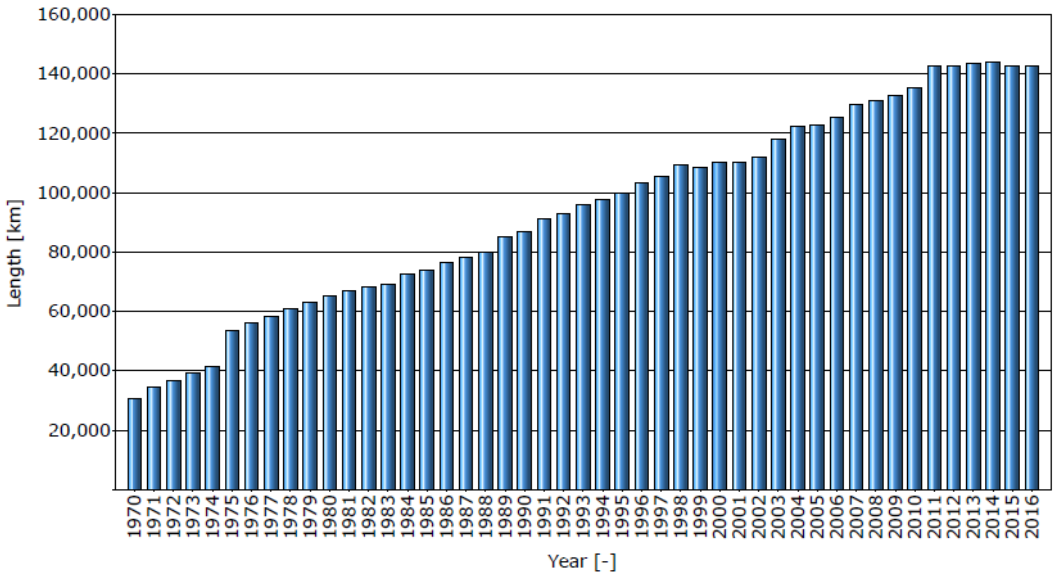
Encara que sigui un mètode que requereix d'una inversió molt gran a l'inici, és molt usat ja que es una instal·lació fixa, el consum energètic es menor als demes i considerablement insensible als canvis meteorològics; però un canvi de trajectòria implica fer una nova instal·lació amb la conseqüent inversió.

Es un sistema que requereix poc personal y a part l'únic que es mou es el producte, no implica com en els vaixells, una flota per poder moure el producte.

Un dels únics inconvenients que té es la part de vigilància i manteniment ja que un incident en un punt de la línia pot implicar l'aturada de tota ella. Encara que a dia d'avui hi ha valvuleria molt avançada i programes que ajuden a aquest control com SCADA, sempre pot sorgir qualsevol incident.

Encara que es un dels sistemes més usats i segurs, en comparació als altres, es evident que la seguretat es el factor més important que sempre es vol millorar mitjançant l'anàlisi quantitativa de riscos (ACR), una metodologia molt amplia en usos però també aplicada en aquest servei.

Gràfic 1 Llargada total del sistema de Pipelines Europeu desde 1970 fins 2016 (



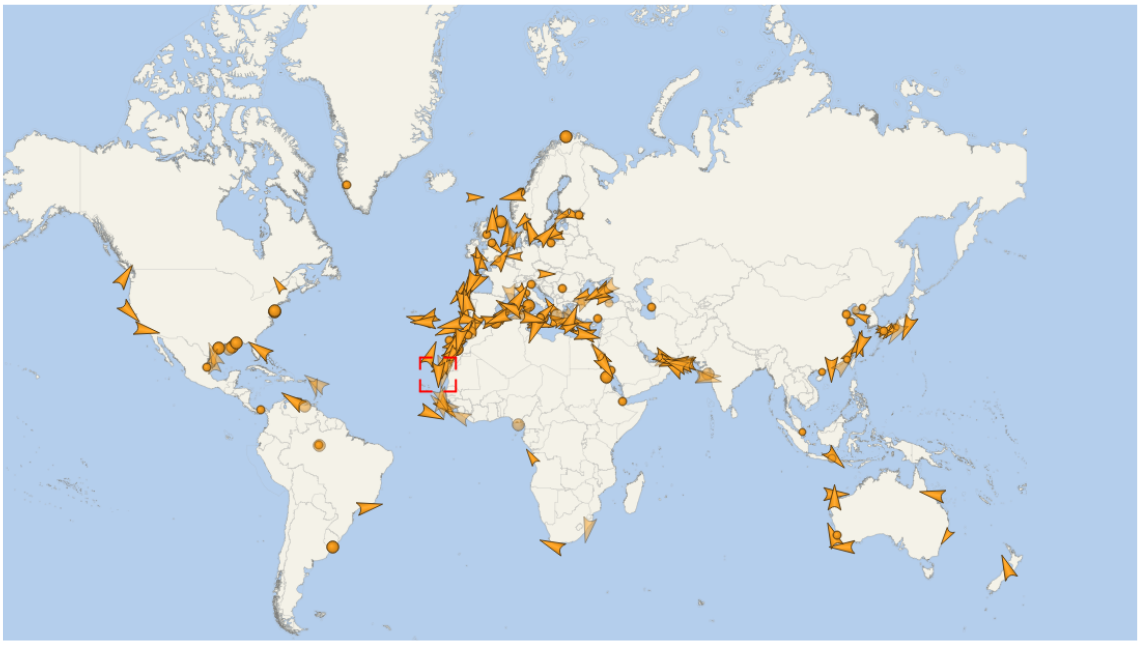
Com es port veure en la figura adjunta, el 1975,1989,1989,1991, 1998,2003, 2007 i 2011 es veuen increments importants deguts a la unió de varies empreses a l'EGIG que es un grup format per les empreses encarregades del transport de gas per Pipeline més importants d'Europa.

2.2. Vaixell

Els primers vaixells que transportaven cru i derivats petrolífers van començar a mitjans del segle XIX, aprofitant bidons de vaixells mercantils. A finals del mateix segle va començar a usar-se vaixells específics per el transport; des d'aquell moment fins ara s'ha passat de transportar milers de tones fins a centenars de milers de tones. Els costos són baixos, però es un mètode sensible a les condicions meteorològiques ja que un incident pot causar un impacte mediambiental molt gran.

Figura 1 Esquema de distribució en un vaixell cisterna

Figura 2 Captura de pantalla del transport marítim de vaixells cisterna a dia 17/03/2018 (



2.3. Camions cisterna

El transport en camions cisterna es el més usats per al pas final que es la distribució al consumidor final ja que es un mètode flexible i àgil encara que transporta una quantitat petita en comparació als demes (aproximadament unes 20 tones). Però aquest mètode requereix molta mà d'obra i té un preu energètic molt elevat. A més es sensible al transit usual de la ciutat.

2.4. Ferrocarril

El ferrocarril es un mètode bastant flexible i menys car que el camió cisterna, sempre ha estat un dels transports més usats fins que les Pipelines s'hi van imposar; a part el ferrocarril no es molt àgil y també requereix unes instal·lacions especials per a la manipulació.

3. Importància del transport per canonada.

L'ús de canonada del tipus Pipelines es el mètode de transport mes usat per moure grans quantitats de líquids o gasos essencials per a la societat. Entre tots el tipus de productes que arriba a transportar es troben els hidrocarburs.

3.1. L'ús de Pipelines a nivell mundial

Les xifres mundials d'enquestes de *P & GJ* indiquen que es planifiquen i estan en construcció 118.623 milles de canonades(190.905km). D'aquests, 88.976 representen projectes en la fase de planificació i disseny; 29.647 milles (47.712km) reflecteixen canonades en diverses etapes de la construcció. Les canonades de gas natural tornen a representar la majoria dels projectes en construcció i planificats. A partir d'una base de dades de la web de la CIA s'ha realitzat una Taula relativa a les longituds de les canonades en funció de l'aplicació que se'ls hi dona:

Taula 1 Longitud de les canonades segons l'ús

Substancia	Longitud (km)
Gas natural	2.030.058
Distribució	1.779.116
Transmissió	250.942
Petróli y derivats	36.275
Olefines	≈6.000
Hidrogen	1500
CO_2	250
Amoniac	200
Total	2.074.283
Total excluint la distribució de gas	295.186

3.1.1. Vista general de la construcció

A continuació es fa una ullada a les longituds noves i planificades del tub en els set grups de països bàsics : Amèrica del Nord - 51.420km; Sud / Amèrica Central i el Carib - 18.621km; Àfrica - 12258km; Àsia Pacífic 55.192km; Antiga Unió Soviètica i Europa de l'Est - 31441km; Orient Mitjà - 18.475km; i Europa occidental i Unió Europea - 3.495km.

3.1.2. Amèrica del Nord

Res no ha canviat les perspectives de la indústria energètica nord-americana com els descobriments a les regions dels EUA i Canadà. Amèrica del Nord - que representa 26.300 milles en les etapes de planificació i 5.651 milles en construcció - ha de seguir sent forta.

L'associació empresarial LP planeja construir un gasoducte de 1,230 milles per transportar l'età de les regions de l'esquisto Marcellus i Utica a Pennsilvània, West Virginia i Ohio al complex d'emmagatzematge de líquids de gas natural de la companyia a Mont Belvieu. El gasoducte tindria una capacitat inicial de 125.000 bpd i es pot ampliar per satisfer la demanda creixent de l'enviador. Les operacions comercials s'inclouen en el primer trimestre de 2014.

Obtenir el gas natural d'Alaska a la costa nord (ANS) ha estat un objectiu difícil, ja que la producció de petroli va començar a finals dels 70. Un projecte que encara s'està avaluant per lliurar el gas natural del North Slope és la canonada de 1,717 milles TransCanada-ExxonMobil Alaska que s'estendria des de Prudhoe Bay fins a punts propers a Fairbanks, Delta Junction, AK i després a la frontera Alaska-Canadà on es connectaria una nova canonada que connectarà amb el sistema de canonades prop de Boundary Lake, AB.

2.1.2.1 Keystone XL

Figura 3 Traçat de la canonada de Keystone

La canonada Keystone XL, amb un cost $ 8 mil milions de TransCanada, és una infraestructura de 875 milles que permet el transit de 830 mil barrils de cru al dia, transporta desde Alberta (Canadà) fins les costes de Oklahoma

https://www.transcanada.com/globalassets/pdfs/oils-and-liquids/keystone-xl/transcanada-keystone-xl-pipeline-map-2.pdf

https://keystonepipeline-xl.state.gov/documents/organization/205719.pdf

3.1.3. Regió Àsia

Els països de l'Àsia i el Pacífic estan duent a terme projectes de construcció massius per satisfer la creixent demanda d'energia. La regió representa la major quantitat de milles de gasoductes noves i planificades. Alguns 35.263 km representen projectes en la fase d'enginyeria i disseny; 22.628km reflecteixen projectes en diverses etapes de construcció amb Xina, Índia i Austràlia, les àrees més actives.

Un dels projectes més importants que s'està desenvolupant a la Xina és el segon gasoducte de Petro China a l'oest a l'est de la Xina. Vuit línies regionals s'han de completar abans de juny. El gasoducte transportarà 30 bilions de metres cúbics l'any de gas des de l'Àsia central i nord-oest de la Regió Autònoma de Uygur a Yangtsi i delta del riu Perla.

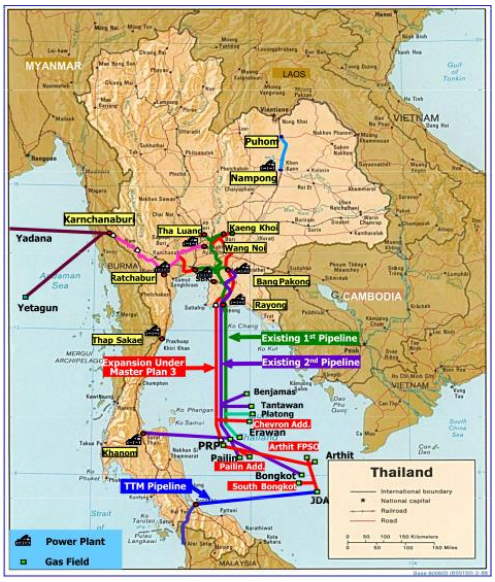
La longitud total del conducte, incloses les línies regionals, és de 9.102km. El projecte recorre 15 províncies i servirà a més de 400 milions de persones.

A l'Índia, un consorci de quatre empreses estatals liderades per Gujarat State Petronet Ltd. (GSPL) ha rebut contractes per a la construcció de tres grans projectes de gasoductes. Els contractes són per a les 1.530km de Mallavaram-Bhilwara en l'estat meridional d'Andhra Pradesh a Bhilwara, al nord de Rajasthan, el canaloducte Mehsana-Bhatinda de 1.025 milles d'occident al nord d'Índia i el gasoducte de 466 milles a Jammu i Caixmir de Bhatinda.

A Tailàndia, Punj Lloyd està construint un gasoducte de 185 milles per a PTT LNG per transportar gas des d'una terminal de GNL prop de Rayong. El projecte requereix 45 cruïlles horitzontals i està previst que finalitzi a finals de l'any 2013.

3.1.3.1 TTM Pipelines

Figura 4 Traçat de la TTM Pipelines



Aquest pipeline de gas es de 255 km y es l'única pipeline que entra a Malasya i que l'abasteix; es de la companyia Petronas i el seu diàmetre es de 34" a 42".

https://en.wikipedia.org/wiki/Trans_Thailand%E2%80%93Malaysia_Gas_Pipeline

http://www.pttplc.com/th/Pages/IntroPage.aspx

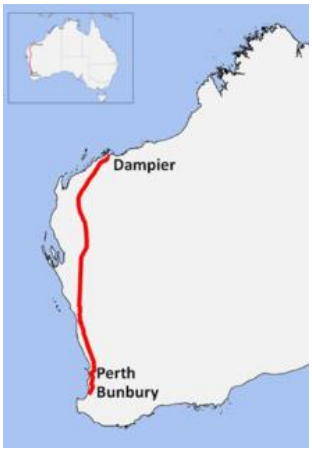
3.1.4. Austràlia

GNL continua sent la gran inversora a Austràlia amb set instal·lacions en construcció i vuit més en la fase de planificació o enginyeria.

Un dels últims grans projectes del país és la planta Santos GLNG LNG de 16.000 milions de dòlars a la illa de Curtis. La planta inclou el desenvolupament de recursos de gas a les conques de Bowen i Surat al sud-est de Queensland, construcció d'un oleoducte de 261 milles de gas des dels camps de gas fins a Gladstone i dos trens de GNL amb una capacitat combinada de 7,8 MTPA a la illa de Curtis.

3.1.4.1 Pipeline de gas natural de Dampier a Bunbury

Figura 5 Traçat de la Pipeline Australiana



La línea comença a la península de Burrup al nord d'Austràlia travessant 1600 km avall cap el sud, a Perth. Aquesta infraestructura té la capacitat de transportar fins 785 TeraJoules per dia, on un Tera Joule dona per el consum de 18250 cases

https://web.archive.org/web/20090913035519/http://www.dbp.net.au/TheStage5BExpansion/download/What-is-the-DBNGP.pdf

3.1.5. Països d'Europa de l'Est

Rússia i les nacions de la FSU i Europa de l'Est tenen el projecte d'incrementar l'activitat petroliera i de gas, iestan construint i planejant grans xarxes de gasoductes cap a Europa i la regió d'Àsia i el Pacífic.

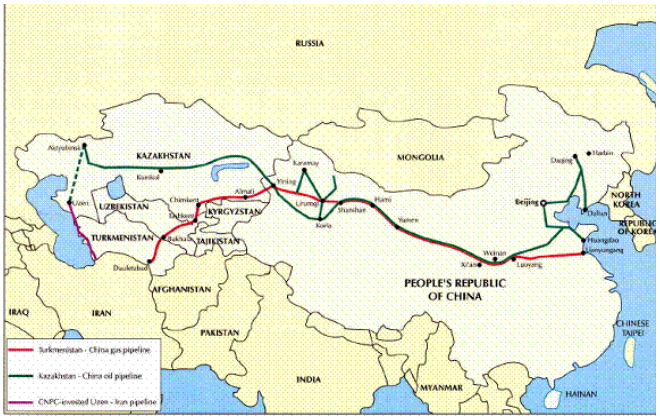
Nord Stream AG va inaugurar el nou sistema de gasoductes Nord Stream el 11 de novembre, que va des de Vyborg, Rússia fins a Lubmin, a prop de Greifswald, Alemanya. Les dues canonades offshore de 1.223km són la connexió més directa entre les grans reserves de gas a Rússia i els mercats energètics de la Unió Europea. Quan estiguin plenament operatius a la fi d'aquest any, els oleoductes tindran la capacitat de transportar un total combinat de 55 Bilions de metres cúbics de gas a l'any a la UE durant almenys 50 anys.

La segona etapa de l'oleoducte de l'Oceà Siberià i el Pacífic oriental (ESPO) que transporta cru rus als mercats d'Àsia i el Pacífic i als Estats Units hauria d'estar en servei fins al final de l'any, molt abans del previst. La primera part que transportava 30 Milions de tones l'any de cru de Sibèria oriental a Skovorodino prop de la frontera xinesa es va iniciar el 2009. Un cop finalitzada la segona part de la canonada d'ESPO de Skovorodino a Kozmino, la capacitat de la costa del Pacífic augmentarà a 30 milions de tones l'any .

Es va iniciar l'any passat el gasoducte Beineu-Bozoy-Shymkent Gas Pipeline Co. Ltd. de Kazakhstan, que és la segona etapa del gasoducte Kazakhstan-Xina. El projecte de 1.300km es construirà en dues fases; la primera consisteix a establir 950km de Bozoy-Shymkent i construir una estació de compressió propera a Bozoy.

2.1.5.1 Oleoducte Kazakhstan-Xina

Figura 6 Traçat de l'oleoducte de Kazakhstan-Xina



L'oleoducte Kazakhstan-Xina, de 2.798km de llarg, transporta petroli cru dels pous situats a l'oest de Kazakhstan a la refineria de Dushanzi, a la província xinesa de Xinjiang. La construcció de la canonada es va dividir en tres segments i es va dur a terme en dues fases. La primera fase va incloure una primera secció de 448km que comença a Atyrau prop del Mar Caspi i acaba en Kenkiyak, Kazakhstan. Aquesta secció es va posar en funcionament a finals de 2003. La segona fase va incloure la construcció d'un oleoducte de 962km, que va des Atasu a Kazakhstan fins Alashankou a la Xina, i una secció de 761km que va de Kenkiyak a Kumkol al centre de Kazakhstan

http://kaztransgas.kz/index.php/ru/o-kompanii/karta-prisutstviya

http://eurasianenergyanalysis.blogspot.com.es/2013/11/china-new-balancer.html

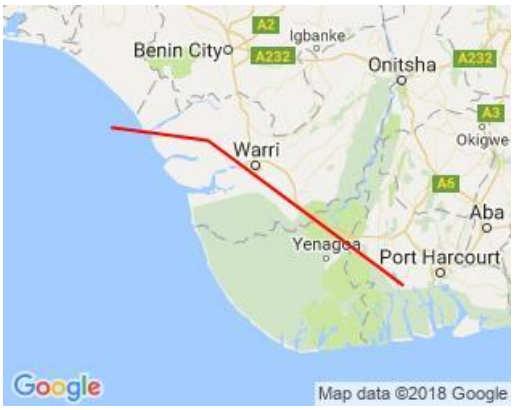
3.1.6. Àfrica

El desenvolupament energètic a l'Àfrica es veu limitat degut als riscos polítics, econòmics, operatius i geopolítics. La regió representa 10.755km de canonades previstes i 1.503km en construcció.

Una àrea que pot tenir la promesa d'una activitat a curt termini és Nigèria. En el Congrés Mundial de Petroli a Qatar, el ministre de Recursos Petroliers, Diezani Alison-Madueke, va resumir 130.000 milions de dòlars en plans d'inversió per als sectors del petroli i del gas durant els propers cinc anys, i va demanar la construcció de 1.245 quilòmetres de canonades de petroli i gas per augmentar el subministrament de gas nacional, una planta petroquímica, noves plantes de fertilitzants i de fabricació i tres refineries de camp verd.

3.1.6.1 Nembe Creek

Figura 7 Traçat de la Pipeline Nembe Creek



La Pipeline Nembe Creek Trunk es una linea de 97 km i es capaç de transportar 600 mil barrils al dia, ja que te un diàmetre de 48 polzades.

https://en.wikipedia.org/wiki/Nembe_Creek_Trunk_Line

3.1.7. Europa occidental / UE

Tot i que es preveu que l'activitat del gasoducte a Europa occidental i els països de la UE augmentés després de la decisió de la Comissió Europea de concedir ajudes per valor de 1.900 milions de dòlars EUA per garantir que no es retardin unes 30 instal·lacions, la creixent crisi financera entre molts països de la UE podria frenar l'activitat a curt termini.

Els projectes programats per rebre subvencions inclouen el projecte Interconnector Turkey-Greece-Italy (ITGI) de 500 milles, Poseidon Pipeline de 130 milles, 281 milles Skanled Pipeline, 2,050 milles Nabucco Pipeline, 235 milles del projecte Odessa-Brody i 130 -Interconnector de Milla Eslovàquia-Hongria.

Una àrea on la instal"lació d'un pipeline està en curs és el Mar del Nord.
Subsea 7 està treballant sota un contracte EPIC de Total E & P UK Limited en el camp de Laggan i Tormore de gas d'aigües profundes situat a l'oest de Shetland al Mar del Nord. El principal àmbit de treball del subsea 7 comprèn l'enginyeria, la fabricació i la instal·lació de 88 milles de canonades de servei de guix de 8 polzades i 2 polzades.

Al Mar de Barents, Eni Norge va adjudicar un contracte a Technip amb un valor de 200 milions d'euros per al desenvolupament del camp de Goliat. Goliat serà el primer camp de producció d'oli noruec al nord del Cercle Polar Àrtic al Mar de Barents. Es troba a 100km al nord-oest de la ciutat d'Hammerfest, a la costa noruega.

3.1.7.1 CLH

Figura 8 Traçat de les línees de la companyia CLH

http://www.clh.es/clhps/staff/section.cfm?id=1&side=2331&lang=en

CLH es la companyia encarregada del transport dins d'Espanya amb mes de 4000 kilòmetres de canonades que enllacen les seves instal·lacions.

3.1.8. Orient Mitjà

A l'Orient Mitjà es planifiquen 8.805 milles de gasoductes i 2.675 milles es troben en diverses fases de finalització.

RASGAS (empresa conjunt. entre Qatar Petroleum i ExxonMobil) planeja desenvolupar el projecte de gas natural Barzan de milers de milions a l'embassament del Camp del Nord a l'oest de Qatar en el Golf Aràbic. El treball inclou un sistema de producció de gas natural a alta mar amb plataformes convencionals, oleoductes intersticials, 180 milles d'oleoductes d'exportació de fins a 24 polzades a la planta de gas Barzan a la localitat industrial de Ras Laffan (RLC).

A Aràbia Saudita, Saudi Aramco va adjudicar un contracte EPIC a Saipem per al desenvolupament de Al Wasit Gas dels camps Arabia i Hasbah offshore. Inclou 12 plataformes de capçalera, dues plataformes d'unió i una plataforma d'injecció, una línia troncal d'exportació de 36 polzades,

3.1.9. Sud i Centreamèrica / Carib

Diversos països del sud, centreamericans i del Carib estan implementant plans per a una nova infraestructura de canonades.

A Brasil, Petrobras construeix un gasoducte d'etanol de 800km per connectar les principals regions productores d'etanol a Minas Gerais i São Paulo als grans centres consumidors de São Paulo i Rio de Janeiro.
La primera secció s'estendrà a 300km de Ribeirão Preto a Paulinia. La segona fase consisteix en la construcció cap al nord a través dels estats del mig oest. El sistema s'ampliarà a Barueri i Guarulhos a São Paulo i Duque de Caxias a Rio de Janeiro.

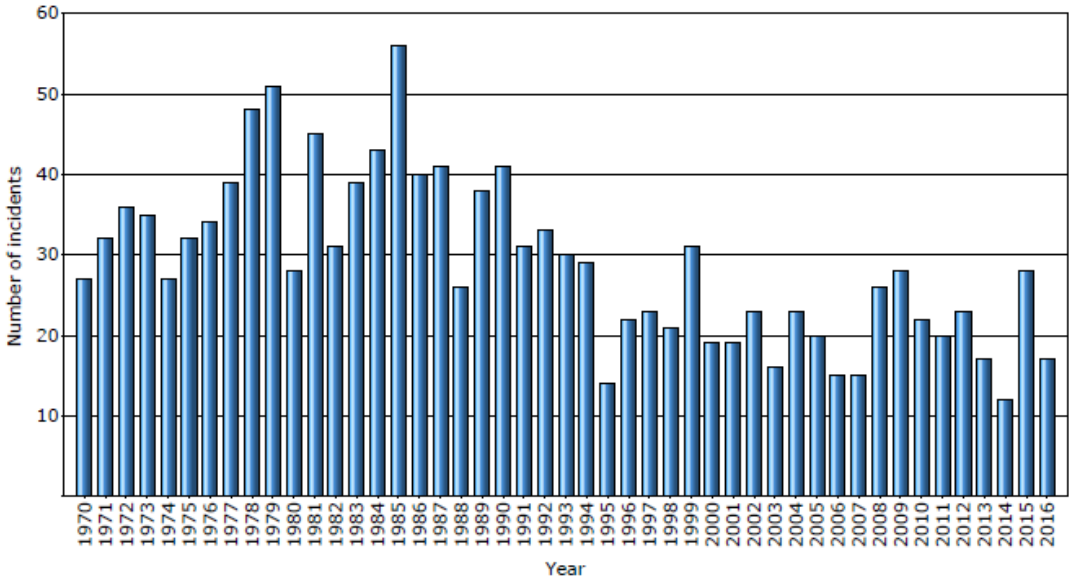
4. Accidents en Pipelines

L'estudi sobre les dades d'accidents ocasionats en Pipelines que transporten substàncies perilloses permeten obtenir una visió millor per al nostre cas d'estudi.
Primerament es realitza un anàlisi sobre les estadístiques dels accidents en canonades. Després s'analitzen varis casos importants de fuites.

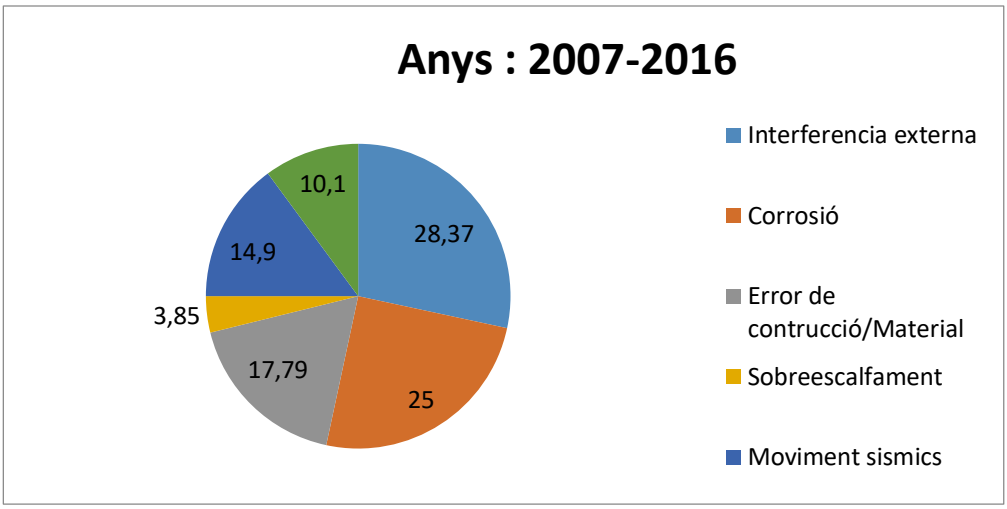
4.1. Dades estadístiques d'accidents

Al llarg d'aquest capítol s'analitza l'origen dels accidents, tant general com específic, els materials o substàncies involucrats en els mateixos, les causes generals que els provoquen, així com una comparació de l'evolució històrica entre el nombre accidents de canonades de transmissió de gas i els quilòmetres de canonada instal·lats.

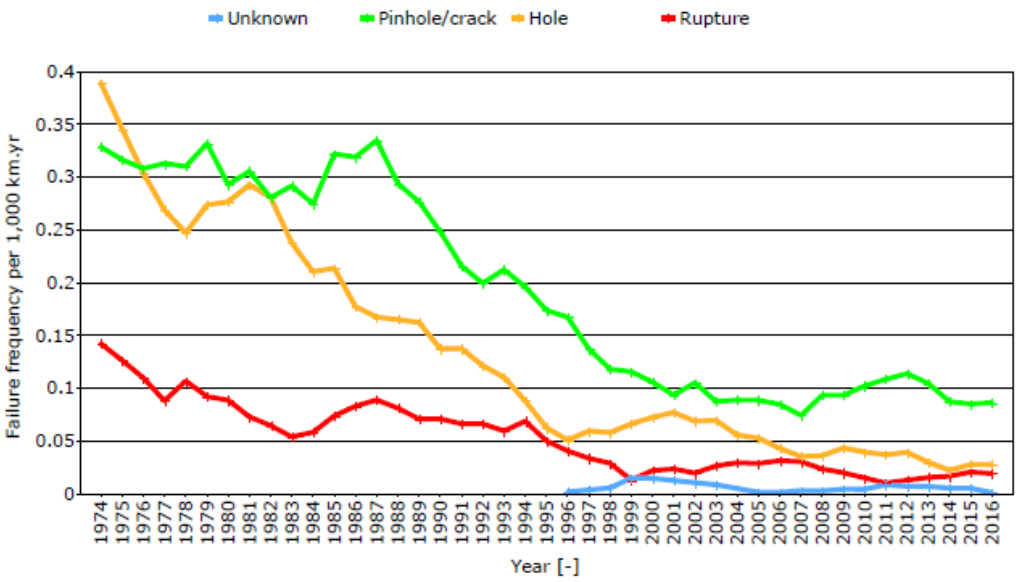
Gràfic 2 Recull d'accidents per any en canonades



Gràfic 3 Distribució d'incidents segons el causant



Gràfic 4 Freqüència de conseqüències dels incidents



D'aquest gràfic podem extreure alguns paràmetres de disseny com:

- Interferència externa: diàmetre de la Pipeline , gruix de la canonada

- Corrosió: Any de construcció. tipus de revestiment de la canonada

- Error de construcció/material: Any de construcció

-Sobreescalfament: diàmetre de la Pipeline

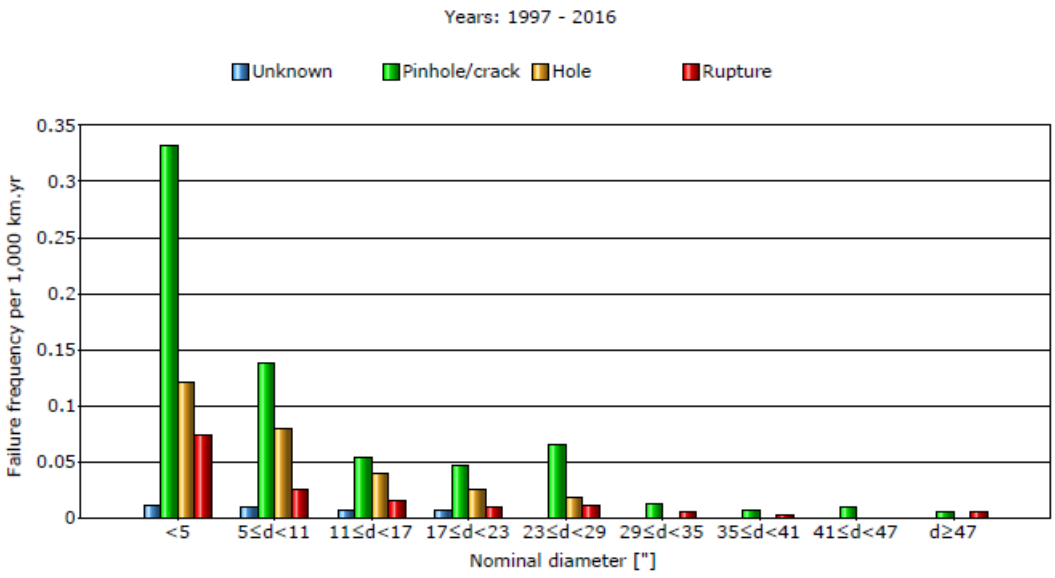
- Moviment sísmic: Diàmetre de la Pipeline

-Altres: altres

Per tant, ara s'analitzarà aquestes conseqüències segons els paràmetres de disseny.

Segons el diàmetre:

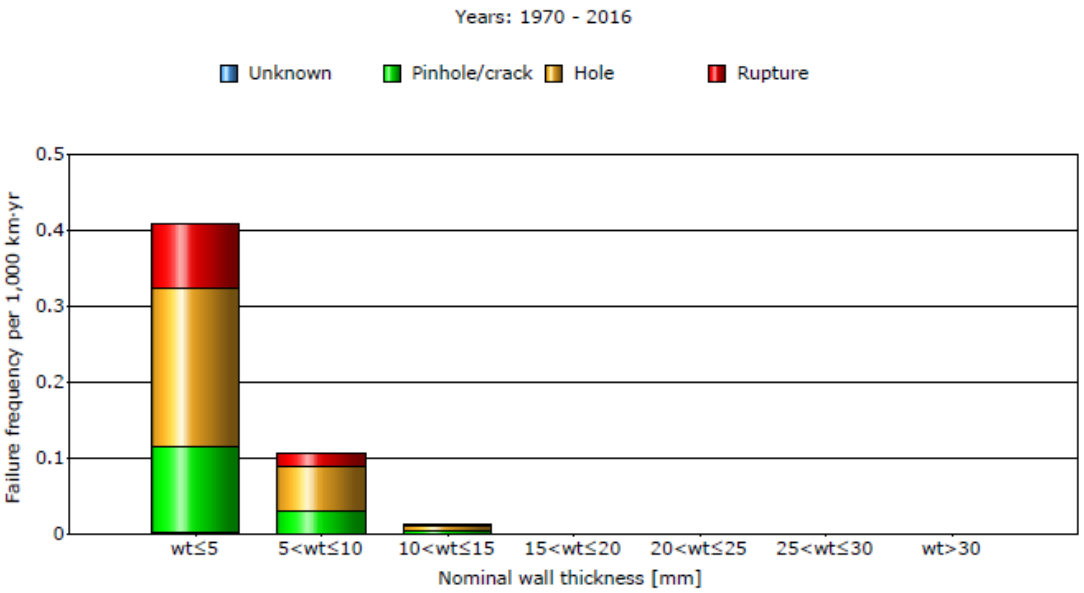
Gràfic 5 Distribució de freqüència d'incidents segons el diàmetre



En aquest gràfic (gràfic X) s'observa que la majoria d'incidents ocorren quan mes petit és el diàmetre de la canonada. Sobretot ocorren petites fuites.

Segons el gruix de la canonada:

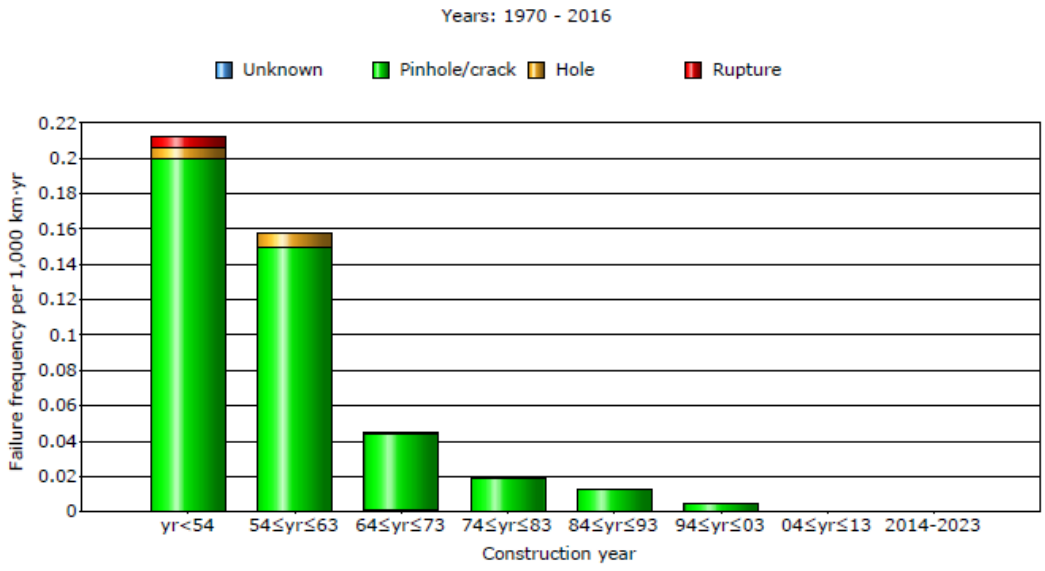
Gràfic 6 Distribució de freqüència d'incidents segons el gruix de la canonada



En aquest gràfic s'observa que com menys gruix té la canonada més freqüents son els accidents

Segons l'any de construcció:

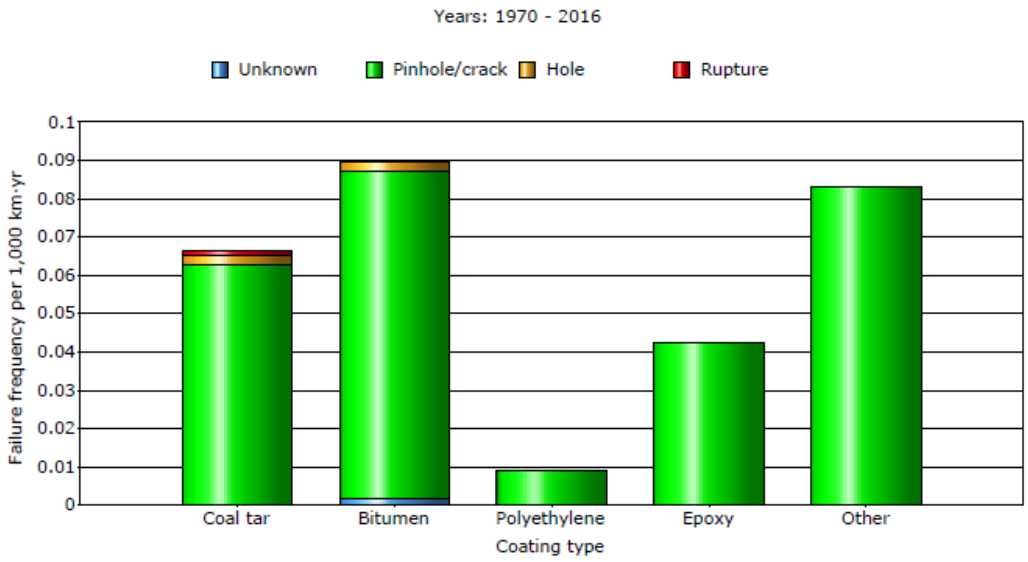
Gràfic 7 Distribució de freqüència d'incidents segons l'any de construcció



En aquest s'aprecia que els únics que tenen ruptures son els construïts abans de l'any 1954, y que son més freqüents com mes vells siguin.

Finalment, segons el tipus de recobriment:

Gràfic 8 Distribució de freqüència d'incidents segons el recobriment



En aquest s'observa que el recobriment de Polietilè destaca per una molt baixa freqüència d'incidents.

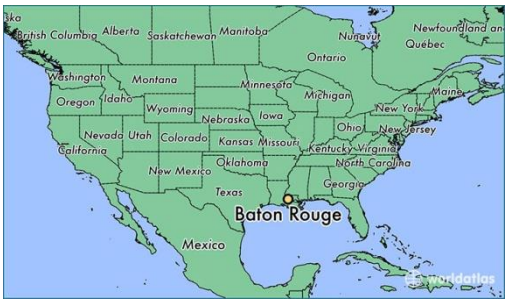
Tots aquests accidents no tenen en compte el Factor humà que es un dels principals causants dels accidents (un 36.9% segons la base de dades de MHIDAS).

D'altra banda a l'apartat anterior es veu com els Kilòmetres de Pipelines augmenten proporcionalment en aquest apartat es veu com els accidents poc a poc es van reduint ja que cada dia que hi ha més mètodes de control i sobretot de prevenció.

4.2. Exemples d'accidents

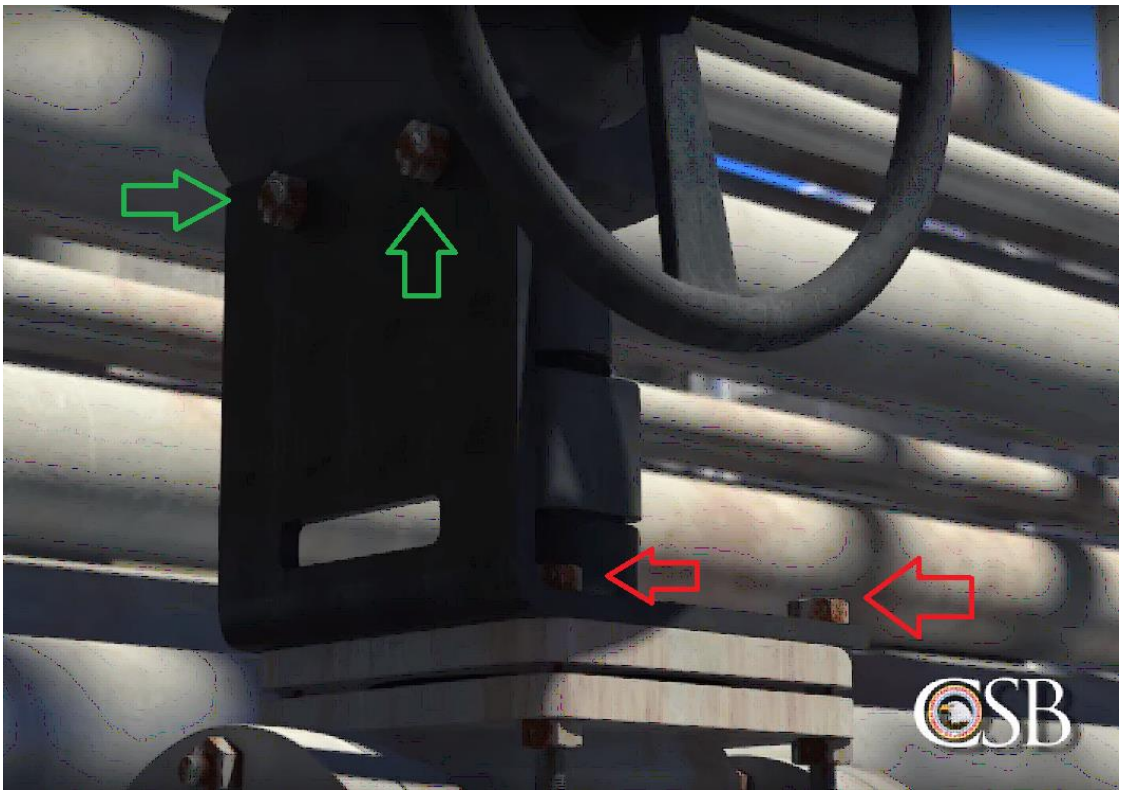
4.2.1. Accident per factor humà: Foc a Baton Rouge

Figura 9 Mapa dels EEUU amb l' ubicació de Baton Rouge



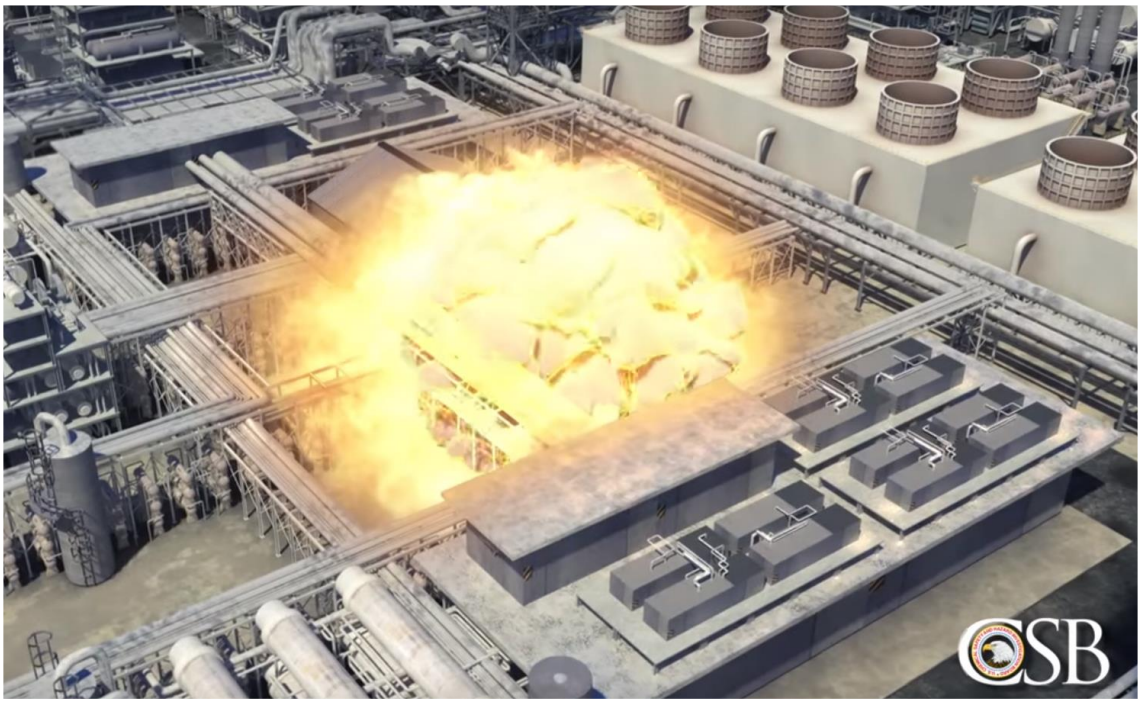
Baton Rouge és la capital de Luisiana, la segona ciutat més poblada de l'estat. L'empresa Exxon Mobil, en el 2015, durant una operativa rutinària en una refineria , dos operaris havien d'obrir unes vàlvules per entrar un corrent d'isobutà a un tanc, van tenir problemes per obrir-ne una usant la roda però aquestes vàlvules disposen d'un segon mètode per obrir-les . Però l'operari no estava prou format així que va descollar els cargols del suport de la vàlvula en comptes de el suport de la roda, com es mostra a la imatge de a continuació on les fletxes verdes són els que haurien d'haver tret i les vermelles les que van treure:

Figura 10 Simulació dels fets amb indicacions del cargols per CBS



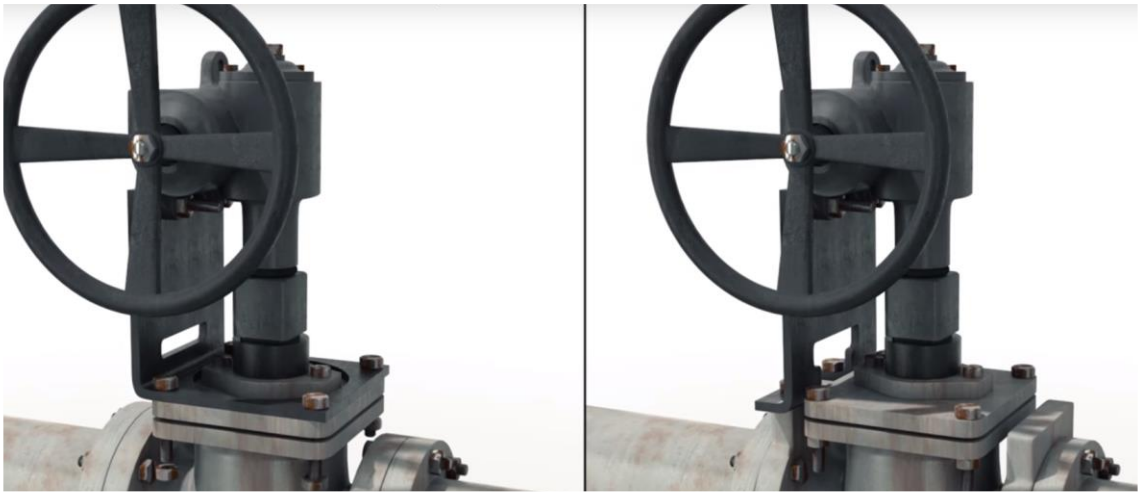
En tot cas, això va provocar una obertura total de la vàlvula i una fuita de 200 mil lliures de isobutà (90.718kg) pressuritzat que en segons va trobar una font d'energia que va transformar aquest núvol d'isobutà en una gran explosió.

Figura 11 Simulació de l'explosió per CBS



Aquesta vàlvula tenia un disseny de fa més de 30 anys, ara hi ha un disseny molt més intuïtiu on la placa dels cargols separa la part de la vàlvula amb la de la roda.

Figura 12 Models de "plugvalves", a l'esquerra el model antic, a la dreta el més nou



Aquest accident va tenir un ferit greu que era un dels operaris i tres subcontractats que estaven fent feines de reparació per la planta. Exxon es va enfrontar al 2016 a multes molt altes i a 9 càrrecs per no complir les inspeccions regulars.

Figura 13 Imatge real de l'explosió i el flashfire

4.2.2. Accident sobre persones: L'accident a Ghislenghien, Bèlgica

Figura 14 Fotografia de l'explosió i el flashfire

El 30 de Juliol de 2004 es va trencar una línea soterrada que transportava gas natural altament pressuritzat. Es tracta d'una xarxa de línees soterrades 1 metre per sota de terra que provenen d'un Pipeline que va des de Zeebrugge fins París, on connecta amb altres que van a Espanya o Itàlia.

El gas natural circulava a 80 bar amb un caudal de 1.6 milions de m3/hora. L'explosió que es va produir arrel de dos canonades, una construïda al 1982 i l'altre al 1991, amb un gruix de 13mm d'acer, es podia controlar ja que es trobava entre dues vàlvules de control automatitzat. Així doncs va ser un accident que podia haver estat evitat ja que la companyia ho tenia monitoritzat.

Setmanes enrere una empresa de construcció va danyar l'estructura de la Pipeline, el dia de l'accident van acudir els serveis de bombers per una possible fuita i posteriorment les unitats especials. Poc després es va produir l'explosió creant una bola de foc de 200 metres de diàmetre, tal va ser l'explosió que va aparèixer una part del conducte de 11 metres de llarg a 200 metres de la seva posició. La calor de l'explosió va arribar a 10 km al voltant de el lloc de l'explosió.

Es un dels accidents més catastròfics d'Europa ja que va deixar 24 morts i 120 ferits, va deixar tot el terreny arrasat en un radi de 200 metres, cotxes, una planta industrial, cases, camps agrícoles, etc. L'estimació dels danys econòmics arriba als 100 milions d'euros.

En el judici 3 dels 14 acusats han estat trobats culpables d'homicidi involuntari, l'arquitecte de els edificis per els quals es va fer l'excavació, la companyia que portava l'excavació i l'home que va danyar la canonada.

4.2.3. Accident sobre el medi ambient: Fuita de Cru a Israel

El 4 de desembre de 2014 va ocórrer una fuita a una Pipeline d'oli cru al costat de la reserva natural d'Israel a prop de la frontera sud. amb una fuita de 3 a 5 milions de litres. No se sap la causa de l'esquerda de la Pipeline, però va originar una espècie de riu negre i dens de 20km .

Això va arrasar un ecosistema molt dèbil enmig del desert a més tots els fruits que puguin sortir dels pocs arbres que van sobreviure tenen una alta probabilitat de ser tòxics.

El ministre va dimitir una setmana més tard, quan l'informe de l'accident deia que estaria tot massa afectat quan tot s'hagués netejat, a part es un país que té una temperatura mitja molt alta així doncs aquest cru a aquestes temperatures allibera fums molt nocius per al medi ambient.

Figura 15 Fotografia del riu d'oli cru

Figura 16 Fotografia de la Pipeline trencada

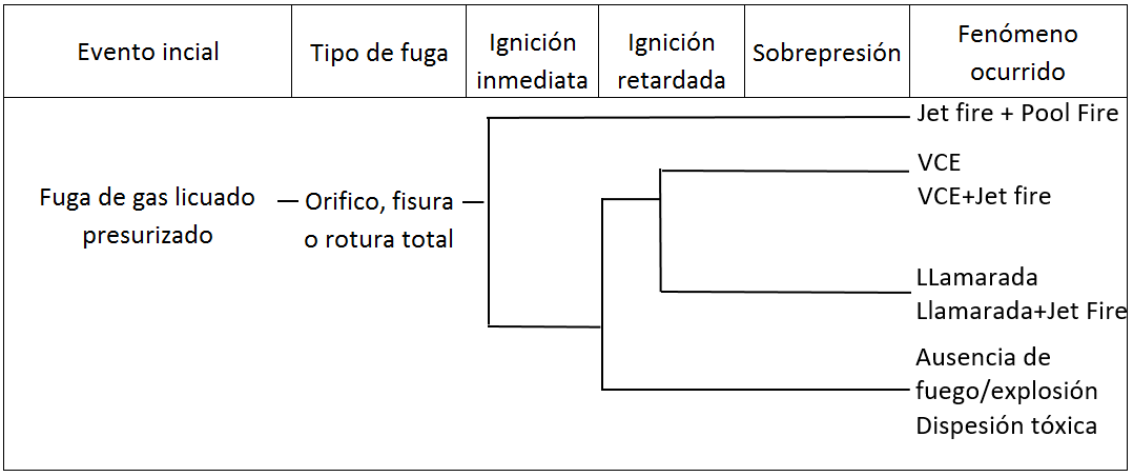
http://articles.latimes.com/2010/dec/20/world/la-fg-1220-mexico-oil-explosion-20101220

5. Modelització dels accidents

Els fenòmens accidentals involucrats en una fuita de material inflamable des d'una canonada són molt variats. Davant d'una possible fuita de combustible en estat líquid o gasós hi ha diferents tipus d'accidents possibles: *pool fire*, flamarada o bola de foc, BLEVE, VCE, etc. Per delimitar l'abast d'aquest projecte, únicament s'han contemplat els fenòmens de flamarada i d'explosió de núvols inflamables (Vapor Cloud Explosion, VCE), com més probables si una fuita de combustible entra en contacte amb una font d'ignició; tots dos escenaris accidentals posteriorment seran simulats en un exemple pràctic.

Són diversos els estats físics i tipus de substàncies inflamables que ens podem trobar sota determinades condicions en ser transportades mitjançant canonades: gasos comprimits, líquids, gasos liquats pressuritzats, i líquids volàtils. En el següent esquema es mostren les condicions requerides perquè tinguin lloc els dos efectes, davant la pèrdua de contenció d'un gas liquat pressuritzat com seria el cas d'una canonada de GLP.

Figura 17 Arbre de events corresponents a una fuita de GLP inflamable (Bubbico et al., 2016)



5.1. Explosions de núvol de vapor

Segons el INSHT les explosions de núvol de vapor no confinades (UVCE) es poden definir com a una deflagració explosiva d'un núvol de gas inflamable que es troba en un espai ample, la seva ona de pressió arriba a una sobrepressió màxima de l'ordre d'un bar a la zona d'ignició.

Aquesta explosió comença amb la fuita d'una gran quantitat de líquid inflamable, generalment volàtil, procedent d'un tanc d'emmagatzematge, procés, cisterna o Pipeline. Perquè una VCE amb una sobrepressió destructiva passi s'han de donar unes determinades condicions.

En primer lloc, la substància abocada ha de ser inflamable i trobar-se en unes condicions de pressió i temperatura adequades. Aquestes substàncies inflamables poden ser tants gasos liquats pressuritzats (propà, butà), com líquids inflamables (ciclohexà, nafta, petroli o benzina) i gasos no liquats (metà, etilè, acetilè).

En segon lloc, prèviament a la ignició, s'ha de formar un núvol, producte de la dispersió de la substància a l'atmosfera. Aquesta fase és anomenada fase de dispersió i el núvol ha de complir determinades condicions de concentració i de massa total de combustible entre els límits d'inflamabilitat (Casal, 2017).

Si es produeix una ignició immediata és molt probable que es produeixin grans flamarades, boles de foc, però amb una baixa probabilitat que s'origini una sobrepressió destructiva, aquest fenomen, no és considerat una VCE. Perquè una VCE passi el núvol de substància inflamable s'ha de formar durant un període de temps determinat, cobrint una determinada àrea. Els períodes de retard d'ignició més típic va d'1 a 5 minuts, encara que al llarg de la història s'hagin registrat explosions amb un retard ignició de pocs segons i fins i tot grans retard d'ignició de fins a 30 minuts.

Així mateix, una quantitat suficient del núvol ha de tenir una concentració compresa entre certs valors per a que sigui possible la seva inflamació. En un núvol de material inflamable, es coneixen tres zones de concentració de material: a) una zona d'alta concentració d'aquesta substància inflamable, a prop del punt de fuga; b) una altra part de baixa concentració, en els extrems del núvol; c) finalment una tercera zona entre les dues, la qual conté concentració necessària per permetre el progrés d'una rapidíssima inflamació capaç de crear una sobrepressió. Cadascuna d'aquestes zones té diferents comportaments davant d'una ignició, sent la nomenada en últim lloc la de concentració necessària per a crear una sobrepressió destructiva. La proporció de cadascuna d'aquestes zones de concentració depèn de diferents condicions com ara la quantitat d'abocament, la mida del punt de fuga, el grau de confinament del núvol, el vent i l'estabilitat atmosfèrica, la humitat i altres efectes ambientals .

Si es donen aquestes condicions i el núvol inflamable entra en contacte amb una font d'ignició, es donarà lloc a la seva inflamació i possiblement una ona expansiva (sobrepressió) que afectarà una àrea determinada.

L'energia alliberada per l'explosió serà funció de la quantitat de substància inflamable involucrada en la mateixa i de les característiques de l'explosió i de l'entorn (confinament), encara que només una petita part d'aquesta energia serà utilitzada per crear l'ona de sobrepressió. A efectes pràctics, l'energia de l'explosió pot ser presa com la mínima energia de combustió, ja que per a algunes substàncies aquestes dues quantitats difereixen en un petit percentatge.

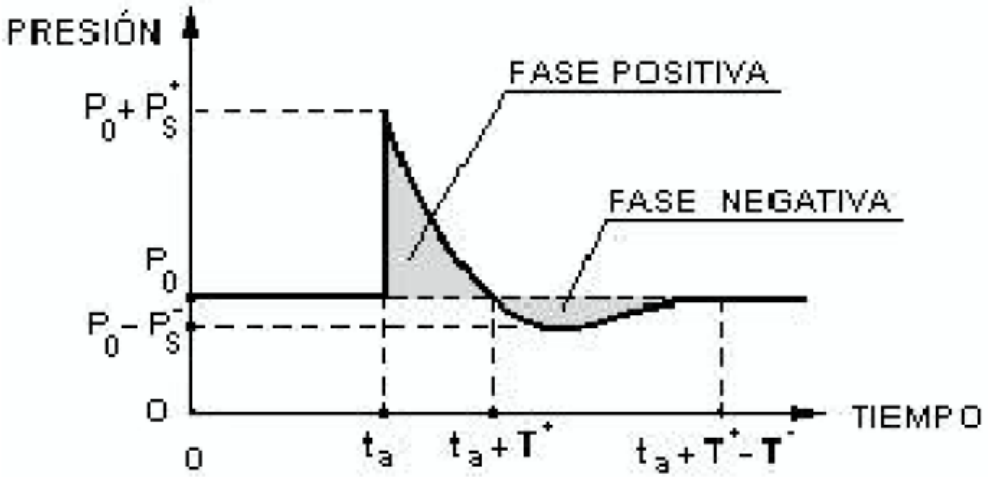
5.1.1. Característiques i modelització matemàtica d'una VCE

La principal característica d'una explosió es l'ona de sobrepressió que genera.

L'energia mecànica de l'explosió constitueix una ona expansiva que viatja a una certa velocitat per l'atmosfera. La sobrepressió que es genera és resultat de dos fenòmens: l'increment de la pressió producte de la combustió i la disminució d'aquesta causa de l'expansió dels gasos.

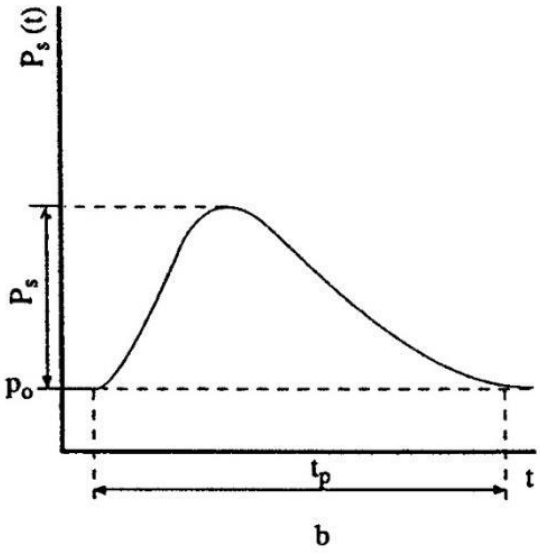
La forma d'ona de sobrepressió depèn del tipus d'explosió. Abans que l'explosió es produeixi, la pressió és l'ambiental $P0$. En una ona de sobrepressió ideal, la sobrepressió s'incrementa de manera instantània a un valor $P0 + \Delta P$, posteriorment decreix ràpidament cap a un valor negatiu, arribant al seu valor mínim, i torna al valor ambiental $P0$

Figura 18 Forma de l'ona expansiva per a detonacions (INSHT,)



Al valor que ΔP pren se li sol cridar pic de la sobrepressió. Aquest tipus d'ona expansiva anomenada ona de xoc (increment instantani de la pressió), correspon a la detonació Fig. 23 a). No obstant això, les explosions de núvols de gas o vapor inflamable no són mai detonacions (fenomen limitat als explosius convencionals i a determinades explosions mecàniques de recipients).

En les explosions VCE el fenomen que té lloc és una deflagració. En una deflagració, l'increment de la pressió és molt ràpid però no instantani (fig. 23 b) i, per a una determinada quantitat d'explosiu (gas en el núvol), el pic de la sobrepressió és menor, tal com es pot observar en les figures.(Casal 2008)



Per tant, l'ona expansiva té una fase positiva seguida d'una secció negativa o fase de succió. Si l'ona troba un objecte rígid en la seva trajectòria, una pressió transitòria és induïda en la superfície durant la fase positiva. A la paret frontal de l'objecte, aquesta sobrepressió es converteix en una ona local, el valor de la qual pot doblar el valor de l'ona original.

Tot i que els principals efectes destructius associat a una ona de sobrepressió siguin els associats per la inducció de la sobrepressió en el seu valor pic, hi ha una altra variable significativa com és la pressió dinàmica. La pressió dinàmica es crea per un moviment de l'aire induït per l'ona expansiva original i és proporcional al quadrat de la velocitat i de la densitat de l'aire. Un cop la fase positiva ha passat, l'objecte pateix els efectes d'arrossegament o succió, a causa del pas de la negativa.

La durada i l'impuls són també dos paràmetres de rellevància en una ona de sobrepressió. La durada és el temps per al qual la sobrepressió existeix. L'impuls és l'àrea sota la corba pressió / temps, de manera que si integrem la corba podem obtenir els valors dels impulsos positius (i +) i negatiu (i-):

$$i+= \int_1^2 P(t) - P0 \, dt \qquad\qquad i-= \int_2^3 P0 - P(t) \, dt$$

on,

P es la sobrepressió (Pa)

P_0 és la pressió atmosférica (Pa).

5.1.2. Detonació

En una detonació, l'ona expansiva es propaga a una velocitat supersònica a través del núvol de la substància inflamable en qüestió encara sense reaccionar. Com ja s'ha esmentat, l'ona expansiva té una forma característica i un increment gairebé instantani de la pressió (fig. 23). La sobrepressió produïda per la ràpida combustió es propaga pel medi com una ona de choche comprimint la barreja aire-vapor fent que aquesta s'encengui. Per tant, una flamarada i una ona de xoc es propagaran a velocitat supersònica.

A causa d'aquestes característiques, donada una quantitat d'explosiu determinada, una detonació tindrà efectes molt més devastadors que una deflagració. Les ones expansives de determinats explosius, com el clàssic TNT, es comporten de manera gairebé ideal. Això és a causa del baix volum de combustible i de la quantitat d'energia alliberada, la qual s'associa amb una reacció química molt ràpida. No obstant això, la probabilitat que una VCE passi en un núvol de vapor inflamable no confinada és pràcticament menyspreable, essencialment a causa de la manca d'homogeneïtat en la barreja aire-combustible, la qual impedeix que qualsevol detonació sigui propagada. De fet, l'únic cas en el qual se sospita que això va poder ocórrer va ser en l'accident de Port Hudson (Missouri, 1970), en el qual es va generar una explosió d'un núvol de 23 tones de propà.

5.1.3. Deflagració

En una VCE, a causa que el volum de vapor de la substància inflamable present en l'aire és gran i l'energia alliberada és relativament baixa, ja que la velocitat de reacció és molt més lenta que en una detonació, l'explosió és una deflagració. Les deflagracions es caracteritzen per una ona expansiva menys abrupta (fig. 23 b) que es propaga a una velocitat subsònica. Inicialment, la propagació de la flama s'associa amb la calor de combustió i la difusió molecular, i en els primers instants d'una VCE la propagació de la flama passa en règim de flux laminar i la sobrepressió és molt petita. A mesura que l'explosió avança, es genera una turbulència i, com a resultat, la velocitat de combustió s'incrementa. L'ona expansiva d'una VCE s'aproxima al model ideal d'ona expansiva a mesura que va avançant pel núvol.

5.2. Càlcul de la sobrepressió. Mètode de TNT equivalent

Aquest mètode permet predir de forma ràpida i senzilla els danys ocasionats per una explosió de vapor no confinat (UVCE), a partir de la massa de TNT (trinitrotoluè) que equivaldria a la quantitat d'hidrocarbur implicat, és a dir, que ocasionaria el mateix nivell de danys. El TNT és un explosiu convencional. Militarment ha estat molt usat i això fa que els seus efectes hagin estat àmpliament estudiats i tabulats.

La relació entre la massa d'hidrocarbur implicat en l'explosió i la massa equivalent de TNT es dóna segons la següent equació:

$$\mathrm{M}TNT = \propto \cdot \mathrm{MC} \cdot \frac{\Delta \mathrm{HC}}{\Delta \mathrm{HTNT}}$$

ón,

MTNT: massa de TNT equivalent (Kg)
MC: massa de combustible involucrat a l'explosió (Kg)
ΔHC: calor de combustió del combustible involucrat (J/Kg)
ΔHTNT: calor de combustió del TNT (=4,6·106 J/Kg)

∝: rendiment de la explosió (aproximadament del 3%).

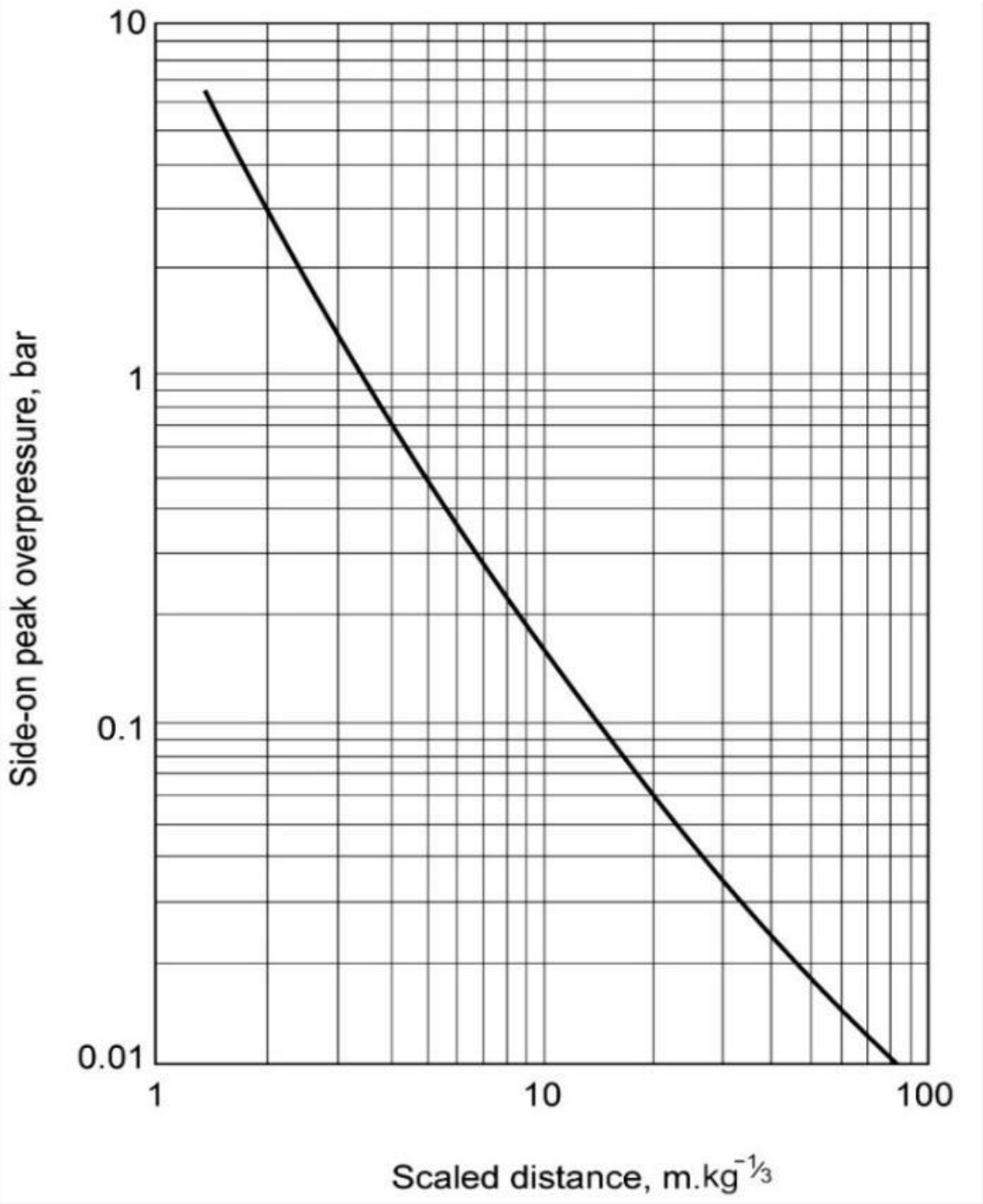
L'ús de l'anterior equació implica diverses dificultats. En primer lloc, el valor del rendiment de l'explosió ha de ser establert. Ja que els hidrocarburs, substàncies comunament involucrades en les VCE, són bastant poc explosius, només una petita part de l'energia alliberada s'inverteix en crear l'ona expansiva: diferents autors han proposat valors entre l'1% i el 10%.

En relació amb la massa de combustible involucrada en l'explosió, es contempla el pitjor cas, assumint així que la totalitat de la massa de combustible fugat contribueix a la generació de l'esclat. No obstant això, alguns autors defensen que només la massa present dins el contorn mínim d'inflamabilitat ha de ser considerada (Arnaldos et al., 2016).

Un cop coneguda la massa de TNT equivalent, es pot determinar el valor del pic de sobrepressió en un punt situat a una distància del lloc de l'explosió. Això pot efectuar-se mitjançant el gràfic Fig.24 on el valor pic ve donat en funció de l'anomenada "distància normalitzada" (dn), que es determina segons la següent equació:

$$\mathrm{dn} = \frac{\mathrm{d}}{\sqrt[3]{\mathrm{M}TNT}}$$

Figura 19 Distancia normalitzada vs valor Pic (casal 2008)



De fet, només una petita fracció de l'energia despresa es converteix en energia mecànica, la major part d'aquesta es converteix en energia lluminosa. Tenint en compte que l'energia alliberada per la combustió d'1 kg d'hidrocarbur és aproximadament igual a l'alliberada per 10 kg de TNT, és aquest baix rendiment el que fa que les explosions de núvols de vapor no confinades no arribin a ser tan devastadores com en teoria podria ser (Casal, 2008).

5.3. Flamarada (Flash Fire)

El comportament de les flamarades és relativament poc conegut, ja que es té poca informació al respecte, si ho comparem amb la resta de focs accidentals. Això és degut a que generalment els seus efectes sobre els diferents objectes i equipaments involucrats són menyspreables (si bé les conseqüències sobre persones poden ser molt greus). Per aquest motiu, pocs autors han publicat models matemàtics capaços de predir i simular els efectes d'una determinada flamarada. Tot i així, hi ha diversos autors que, a partir de dades experimentals i imatges, han proposat models aproximats que podrien fer un càlcul aproximat de la seva altura i velocitat de propagació.

Una flamarada és la combustió d'un núvol de vapor generat per una fuita d'una substància inflamable, la qual una vegada barrejada amb l'aire arriba a una font d'ignició.

La velocitat de combustió en un flamarada és una mica més gran comparat amb la fase laminar. Aquesta diferència és deguda a factors externs com podrien ser l'aire o la rugositat del terreny.

La diferència entre una flamarada i una VCE recau únicament en la velocitat de combustió i en el possible confinament. Aquesta velocitat de combustió determinarà si es crea una sobrepressió destructiva (VCE) o no (flamarada).

Una flamarada és la combustió ràpida d'un núvol inflamable i sense efectes mecànics involucrats en ella. Es tracta d'un foc accidental no explosiu, no crea una sobrepressió. Aquest núvol inflamable sol està composta per una barreja d'aire i gas o vapor inflamable, procedent d'una fuga.

Aquests fenòmens ocorren quan, després de produir-se una fuita de material inflamable, gas o vapor, aquest és dispersat en l'aire, sota unes condicions meteorològiques favorables per a la seva dispersió, creant un núvol amb concentracions variables. Si després d'un determinat període de temps, hi ha un punt d'ignició en contacte amb una part del núvol, amb una concentració dins del rang d'inflamabilitat, s'iniciarà una flamarada amb origen en aquest punt i propagant cap a totes direccions, sempre condicionant per el vent i objectes que interfereixin en la seva trajectòria. La velocitat de propagació d'aquesta flamarada dependrà, majorment, del tipus de combustible abocament i de la velocitat del vent. En algunes ocasions, aquesta flamarada entra en contacte amb el punt de fuga, de manera que es podria arribar posteriorment a convertir-se en un pool fire.(Casal, 2017)

Entre tots els tipus de focs accidentals que poden ocórrer durant la manipulació, l'emmagatzematge o el transport de materials inflamables, les flamarades són el fenomen menys estudiat. Això és a causa de la poca quantitat de dades experimentals disponibles, es tracta d'un fenomen que es podria descriure com efímer, durant el qual, és difícil fer observacions i mesuraments que ajudin a establir models matemàtics que determinin de manera aproximada el comportament d'aquests.

A causa de la curta durada d'una flamarada, el dany potencial en equipaments, donat per l ' "efecte domino" és menyspreable. No obstant això, es considera que el contacte d'una persona amb la flamarada produïda és letal.

D'aquesta manera, es determina que, dins el radi de la flamarada, els dany en equipament són menyspreables, excepte determinats casos com els tanc de sostre de membrana o sostre flotant, podent originar un incendi de tanc en aquest cas. D'altra banda, qualsevol individu present en el radi de propagació de la flamarada es considerarà com una baixa. Fora del radi de la flamarada, es considera que les sobre persones són nul·les, menyspreant així mateix l'efecte de la radiació produïda per aquesta gran combustió.

D'aquesta manera, l'objectiu de càlcul i estimació de les flamarades recau sobre la predicció de l'àrea d'abast de la flama i no tant en les característiques inherents de la mateixa. No obstant això, l'estimació d'aquestes característiques com són la mida, velocitat de propagació de la flama i la intensitat de la radiació tèrmica produïda en diferents punts del núvol inflamable, és de gran ajuda en aquells casos en què vulguem fer una predicció més rigorosa [7].

5.3.1. Modelització i càlcul

Tot i la ja comentada escassetat de dades experimentals respecte a les flamarades, diferents autors han analitzat com predir algunes de les seves característiques. Paràmetres com la variabilitat de concentracions de gas inflamable en els diferents punts del núvol inflamable, amb porcions d'alta concentració i altres amb molt baixa concentració, dificulten la tasca de càlcul.

Per predir l'àrea de ALANÇ de la flamarada, prèviament ha de ser estimada la dispersió atmosfèrica. S'ha de d'assumir que la regió inflamable és aquella en la qual els valors de concentració de substància inflamable es troben entre el màxim i mínim valor d'inflamabilitat (límits superior i inferior). Així, l'abast de la flama està determinat per la regió límit la concentració correspon al mínim valor d'inflamabilitat. En algunes ocasions, aquest límit coincideix amb el contorn visible del núvol de substància inflamable, el qual al seu torn depèn de la humitat relativa de l'aire (Vilchez et al. 2013). No obstant això, aquest pot ser incrementat a causa de l'expansió del núvol durant la seva inflamació.

Entre alguns models publicats, cal a destacar el de Fay i Lewis (1976). Aquests autors van basar el seu model en proves pilot d'inflamacions de núvols elaborades amb metà, età i propà, i van assumir que el foc adquiria una geometria esfèrica. No obstant això, proves elaborades a gran escala han demostrat comportaments diferents. El model més conegut i més utilitzat és el proposat per Raj i Emmons, 1975. Raj i Emmons van modificar un model prèviament elaborat per Steward, 1964 per pool fires d'hidrocarburs, aplicant els següents supòsits: geometria bidimensional, combustió controlada mitjançant convecció natural i gruix del núvol de vapor uniforme i no afectat per les flames. El seu model assumeix una flamarada amb una altura donada, funció de constants empíriques i de la concentració de combustible, la qual viatja a través del núvol de vapor a una velocitat proporcional al vent. No obstant això, aquest model prediu flamarades de massa altura, comparat amb altres dades experimentals d'altres autors. A més, aquest model assumeix que la velocitat és zero en absència d'aire, la qual cosa no sembla molt lògic.

Un model molt més simple va ser publicat per Cracknell i Carsley, 1997, el qual no té en compte la variació de la concentració de combustible a través del núvol(Kumar et al, 2001), van proposar un model numèric capaç de predir l'altura de la flamarada, assumint constant la concentració de substància inflamable en el núvol. Finalment, Rigas i Sklavounos (2006) van simular numèricament flamarades de manera molt aproximada.

Un cop es disposa de models capaços d'apropar la mida de la flamarada i la seva velocitat de propagació, la intensitat de radiació rebuda a certa distància de la flamarada és calculada mitjançant el "model del cos sòlid", tenint en compte el moviment de la flamarada , el qual canvia contínuament el factor vista i la transitivitat atmosfèrica.

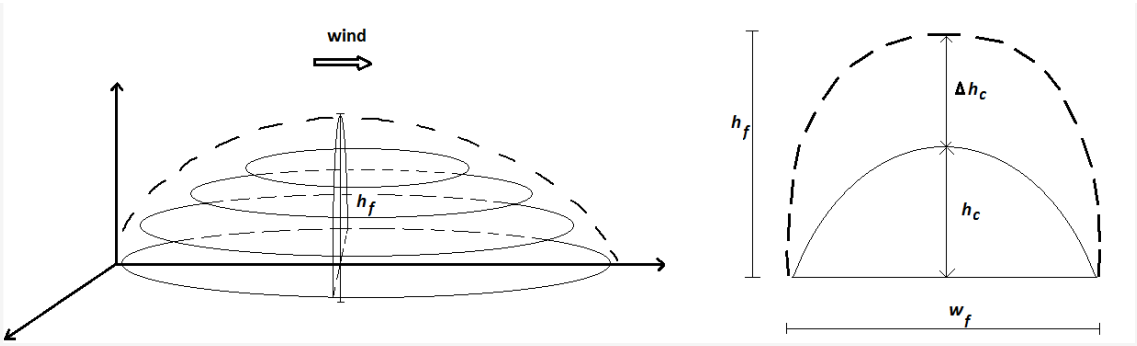
5.3.2. Tamany de la flamarada

L'abast que participa en la flamarada serà aquell relacionat amb la zona la concentració de combustible estigui entre els límits d'inflamabilitat (Vilchez et al. 2013). La mida i forma de la flamarada dependrà de les condicions meteorològiques, característiques de la fuita de combustible (flux i manera d'escapament) i tipus de combustible (per exemple la forma d'un núvol de gas natural liquat no serà la mateixa que el d'una de gasolina).

D'acord amb les observacions realitzades en les imatges preses per (Blackmore et al. 1982) durant els experiments de Mapling Sands, se li atribueix una forma semielipsoidal.

Normalment, l'alçada de les flames és força més alta que l'altura del núvol inflamable visible, a causa del empenta i l'expansió originada per la combustió, la qual mou en sentit vertical ascendent el gas inflamable.

Figura 20 Altura de les flames (Vilchez, 2015)



D'aquesta manera, l'alçada de les flames pot obtenir com una funció de l'altura del núvol de combustible.

$$h_f = k \cdot h_c$$

on,

k: constant que depèn del combustible.

h_c: Altura del núvol de combustible.

Per un núvol de LNG la constant k pren un valor de 5 normalment.

5.3.3. Velocitat de la flamarada

La velocitat a la qual la flamarada avança a través del núvol inflamable depèn principalment del tipus de combustible i la concentració d'aquest, sent considerablement influenciada per la velocitat del vent.

Si s'analitzen els resultats obtinguts de diferents proves experimentals, es pot observar una dispersió significativa de les dades. Les flames van arribar velocitats transitòries fins a 28 m · s-1 per al propà, i fins a 10 m · s-1 per al gas natural (Mapling Sands test); però, les velocitats mitjanes de la flamarada a través de tota el núvol van ser bastant més baixes, aproximadament 12 m · s-1 per al propà refrigerat i de 10 m · s-1 per al gas natural (Blackmore et al. 1982, Hirst i Eyre 1983).

Raj i Emmons van proposar una expressió simple obtenint el valor de la velocitat d'avanç de la flamarada com una funció del vent; però, aquesta expressió perd totalment la seva fiabilitat quan la velocitat del veient és nul·la, ja que la velocitat d'avanç de la flamarada passa a ser nul·la.

A partir dels ja esmentades proves experimentals, un conjunt de valors específics de velocitats mitjanes de la flamarada en funció de la velocitat del vent van ser seleccionats. Tot i que hi ha una significativa dispersió entre ells, s'observa clarament com la velocitat de la flamarada augmenta de manera lineal amb la velocitat del vent, confirmant l'observació del mateix comportament per altres autors (Raj i Emmons 1975; Muden 1984).

A partir dels esmentats valors es va obtenir la següent expressió, en la qual la velocitat d'avanç de la flamarada és funció de la velocitat del vent.

$$U_f = 2.1 \cdot U_w + 0.93$$

Tenint en compte l'origen de les dades experimentals usats per al càlcul de l'expressió, aquesta podria ser aplicada per núvols de LNG i LPG. Com aquestes flamarades tenen principalment un desplaçament ascendent, la seva velocitat respecte al terra es veu reduïda segons la següent expressió.

$$U_f = 2.1 \cdot U_w + 0.93 - U_w$$

5.3.4. Intensitat de la radiació tèrmica

Un cop s'han definit les expressions matemàtiques i models que defineixen la forma i la velocitat d'avanç de la flamarada, és possible predir el flux tèrmic rebut per un objectiu a una determinada distància del punt d'origen, on es produeix la ignició del núvol inflamable. Per calcular això, és possible aplicar el model de cos sòlid.

Per utilitzar aquest model, són necessaris els següents factors. a) El factor de vista, el qual canviarà segons la posició de la flamarada; b) La transmissivitat atmosfèrica, la qual també es veurà afectada per la distància entre la superfície de la flamarada fins a l'objectiu que rebrà la radiació tèrmica, i finalment de c) Poder emissiu superficial de la flama (Arnaldos et al., 2016) .

Tant el factor de vista com la transmissivitat atmosfèrica poden ser obtinguts a partir de diferents equacions comunament usades. El poder emissiu superficial només pot ser obtingut a partir de dades experimentals, on es dóna una dispersió entre valors força significativa entre aquests.

Així doncs, podem calcular la intensitat de la radiació tèrmica (I), assolint un objectiu segons la següent expressió:

$$I = E \cdot F \cdot \tau$$

E: poder d'emissió superficial, kW m-2
F: factor de vista, -
τ: transmissivitat atmosfèrica, -

La distancia entre l'objectiu i les flames, així como la amplada de la flamarada (W), varia al llarg del núvol

5.3.5. Pool fire i Jetfire

En el cas d'un trencament d'una canonada subterrània que transporta un gas o un líquid a certa pressió, normalment es forma un cràter. Si el fluid alliberat és inflamable i hi ha una font d'ignició, hi haurà un incendi: un "poolfire" o incendi de bassa si el líquid en qüestió fos un líquid i un jetfire si aquest és un gas.

Els "pool fires" estan caracteritzats per una difusió de les flames turbulents en una piscina de fuel que s'ha vaporitzat. el líquid rep calor de les flames per convecció i radiació i pot perdre o guanyar calor segons la conducció.

L'índex de calor va en funció del diàmetre de la piscina. Blinov i Khudiakov van desenvolupar un estudi experimental del comportament de les "pool fires" amb diferents fuels i diàmetres, van observar el mateix comportament per a tots els fuels. Variant el Reynolds a partir del diàmetre van veure que per diàmetres més grans les flames eren totalment turbulents.(Casal, 2017)

Hi ha un model proposat per calcular l'amplada d'un cràter davant el trencament d'una canonada subterrània basat en paràmetres relatius a la canonada (diàmetre, pressió de funcionament), el fluid (relació calorífica específica) i el sòl (densitat del sòl, profunditat de la coberta). A partir d'una anàlisi estadística de quaranta-vuit accidents passats, es va obtenir una expressió polinòmica per determinar l'amplada del cràter CW (en m):

$$CW = 40{,}795 + 0{,}382 \cdot D_{canonada} - 0{,}068 \cdot P + 4{,}844 \cdot d_{coberta} - 10{,}069 \cdot \gamma - 0{,}02\ \rho_{terra}$$

on,

D_{canonada}: és el diàmetre de la canonada (m)
P : es la pressió interna (bar)
$d_{coberta}$: es el grossor de la coberta (m)
γ : coeficient de dilatació adiabàtica del fluid (-)

ρ_{suelo}: es la densitat del terra (kg m^{-3})

Aquesta expressió ens permet realitzar una predicció aproximada de l'amplada del cràter

Models de dispersió de gasos a l'atmosfera

Un dels aspectes clau a considerar en l'anàlisi de l'estimació de les conseqüències de les emissions accidentals a l'atmosfera de contaminants procedents d'activitats industrials és la seva dispersió en el medi ambient.

La densitat del contaminant condiciona l'evolució d'un gas / vapor a l'atmosfera, distingint-se tres possibilitats:

- Gasos lleugers. Densitat inferior a la de l'aire.

- Gasos passius o neutres. Densitat similar a la de l'aire.

- Gasos pesats. Densitat més gran que la de l'aire.

Una altra característica és la durada de la fuita, en aquest projecte es considera un tipus de fuita. Es crea una fuita en un punt determinat d'una canonada i es crea una fuita continu de gas propà (LPG).

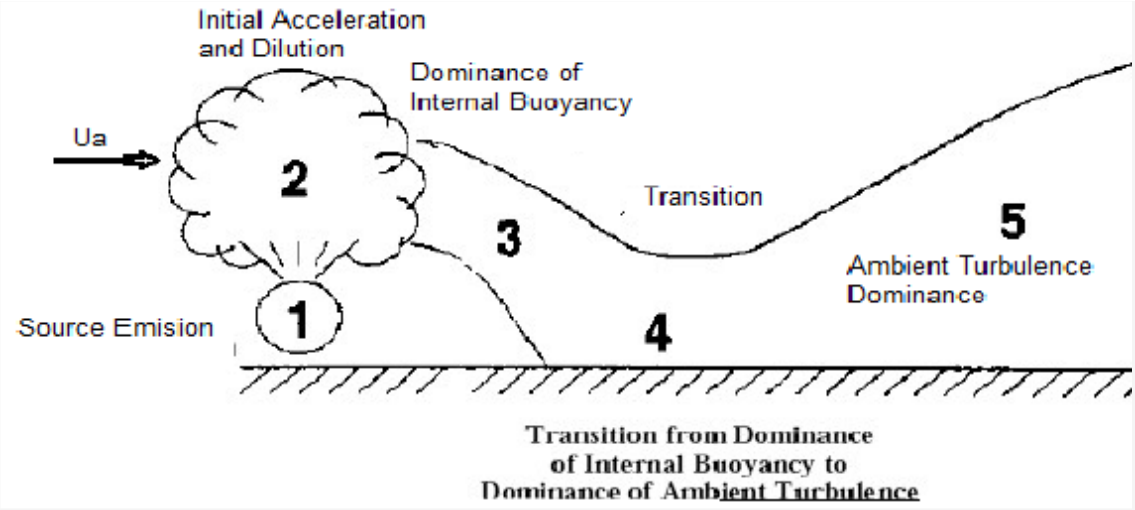
La majoria dels incidents per escapament comencen amb una descàrrega d'un producte perillós des de la seva continent normal. Aquests incidents es poden originar per orificis o trencaments de

recipients de procés, per juntes d'unió en brides, o per vàlvules i sistemes de ventilació d'emergència, per destacar les causes més freqüents [19].

Els fuites poden ser en forma de gas, de líquid o en fase mixta líquid-gas. Si bé cal assenyalar que en fase líquida i mixta l'aportació màssica de la fuita és molt superior i la velocitat d'evaporació de determinar la quantitat aportada per a la formació del núvol. D'aquí la perillositat de fuites de gasos liquats del petroli

A continuació es mostra una configuració típica d'una fuita a nivell sòl

Figura 21 Esquema de fuita a nivell del terra



Els gasos pesats mostren una elevació inicial del plomall causa de l'impuls de sortida, com succeeix en tota fuita, seguida d'una certa caiguda en corba per influència de la seva densitat. Comparant-los amb els gasos neutres es veu que els gasos pesats presenten en els moments inicials un comportament diferent, per la qual cosa s'han desenvolupat models sofisticats que no es consideren en aquest document. No obstant això, al cap d'un cert temps i a mesura que es dilueixen en l'aire, les característiques i el comportament es poden assimilar als d'un gas neutre.

Descripció del model

El fonament per al model de Pasquill-Gifford és una dispersió gaussiana en els eixos horitzontal i vertical (fig. 30). La fórmula normalitzada per a la dispersió d'una font puntual elevada és:

$$C = \frac{G}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} * exp[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2] \{exp[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2] + exp[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2]\}$$

on,

C = concentració en el punt x, y, z (kg/m3)

G = Intensitat de l'emissió (kg/s)

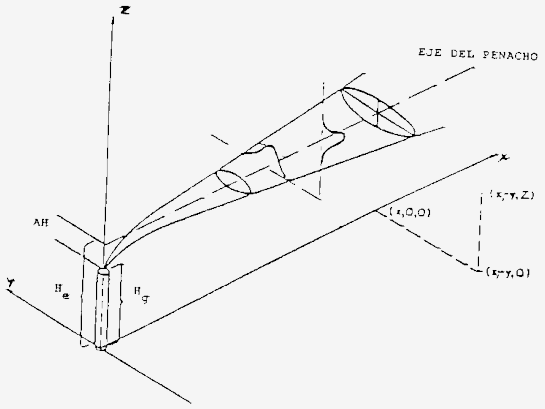
H = Altura de la font emissora sobre el nivell del terra més l'elevación del plomall (m)

σ_y, σ_z = Coeficients de dispersió (m).

U = velocitat del vent (m/s)

La utilització d'aquesta fórmula està limitada a distàncies entre 100 m i 10 km i és aplicable per curts períodes de temps, fins a uns deu minuts, que és el temps mitjana o temps de mostreig normalitzat. Per a períodes de temps superiors a deu minuts, la concentració vent baix de la font d'emissió és en certa manera inferior, a causa de l'alteració de la direcció del vent.

Figura 22 Esquema elevació del plomall



Estimació de l'elevació del plomall

L'elevació del plomall (Δh) es defineix com la diferència entre l'altura de la línia central final del plomall i l'altura inicial de la font. Aquesta elevació està originada per la força ascensional i l'impuls vertical de l'efluent [19].

La temperatura de sortida de l'efluent en el cas que superi en més de 50 ºC la temperatura ambiental, té major influència que l'empenta vertical a la determinació de l'altura que assolirà el plomall.

Com a regla general l'elevació del plomall és directament proporcional al contingut calorífic de l'efluent i a la velocitat de sortida del mateix, i inversament proporcional a la velocitat local del vent.

Una de les fórmules més utilitzades per al càlcul d'aquesta elevació és la de Holland:

$$\Delta h = V_s \cdot du(1{,}5 + 2{,}68 \cdot 10 - 3 \cdot p\, T_s - T_a T_s \cdot d\,)$$

on,

Δh = Elevació del plomall per sobre de la font emissora (m)

V_s = Velocitat de sortida del contaminant (m/s)

d = Diàmetre interior del conducte d'emissió (m)

u = velocitat del vent (m/s)
p = pressió atmosfèrica (mbar)
T_s = temperatura del contaminant (K)
T_a = Temperatura ambient atmosfèrica (K)

$2{,}68 \cdot 10^{-3}$ constant expressada en $mbar^{-1}\, m^{-1}$

Els valors de Δh obtinguts amb aquesta fórmula s'han de corregir (Taula 5) multiplicant per un factor, establert per Pasquill-Gifford-Turner, que és funció de les condicions meteorològiques, que es descriuen més endavant.

Categories de estabilitat (Clases)	Factor de correcció aplicat a Δh
A, B	1,15
C	1,10
D	1,00
E, F	0,85

Taula 2 Estabilitat i factor de correcció

Factors que influeixen en la dispersió del plomall

Les condicions meteorològiques i la durada de la fuita tenen una gran importància en l'abast de la dispersió del plomall. Els factors principals són: la velocitat del vent i l'estabilitat atmosfèrica.

L'estabilitat atmosfèrica ve definida en funció del gradient vertical de temperatura de les capes de l'aire.

Les dades de velocitat del vent i estabilitat atmosfèrica, sempre que sigui possible, s'han d'obtenir d'estacions meteorològiques locals. Atès que no sempre és possible disposar d'aquesta informació, a través d'una taula establerta per Pasquill (Taula 6) es pot obtenir la categoria d'estabilitat atmosfèrica estimada segons les condicions d'insolació i velocitat del vent.

Velocitat del	Insolació diürna	Condicions nocturnes

vent (m/s) a 10m de altura					
	Forta	Moderada	Lleugera		
<2	A	A-B	B		
23	A-B	B	C	E	F
34	B	B-C	C	D	E
46	C	C-D	D	D	D
>0	C	D	D	D	D

Taula 3 Estabilitat segons condicions atmosfèriques

Estabilitat	Coeficient exponencial atmosfèric (p)	
	Urbà	Rural
A	0,15	0,07
B	0,15	0,07
C	0,2	0,1
D	0,25	0,15
E	0,4	0,35
F	0,6	0,55

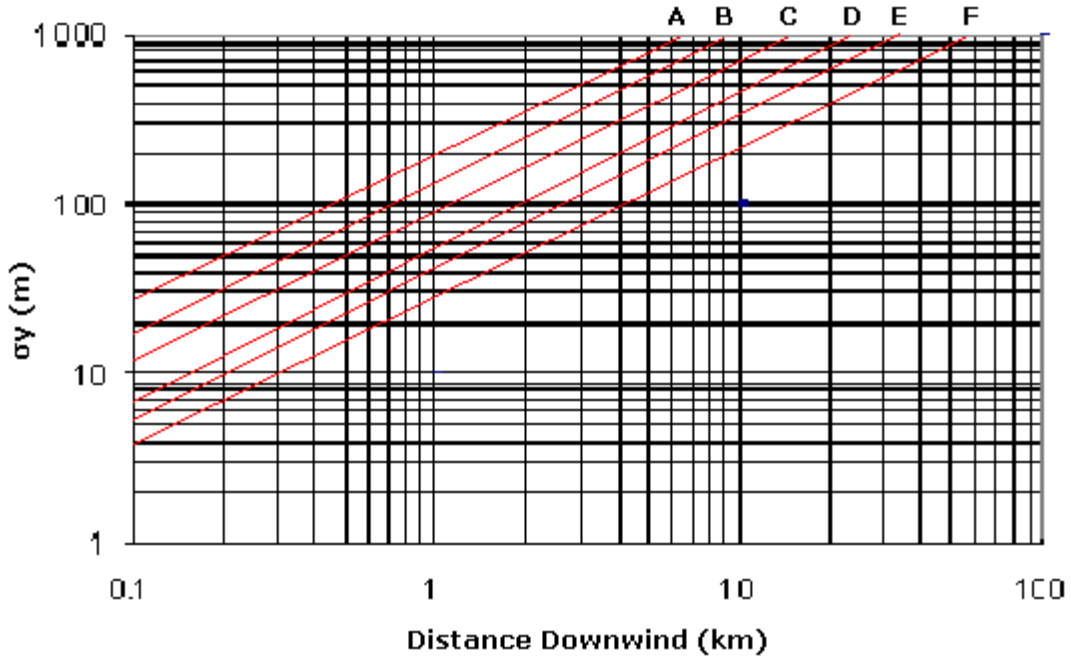
Taula 4 Estabilitat segons zona

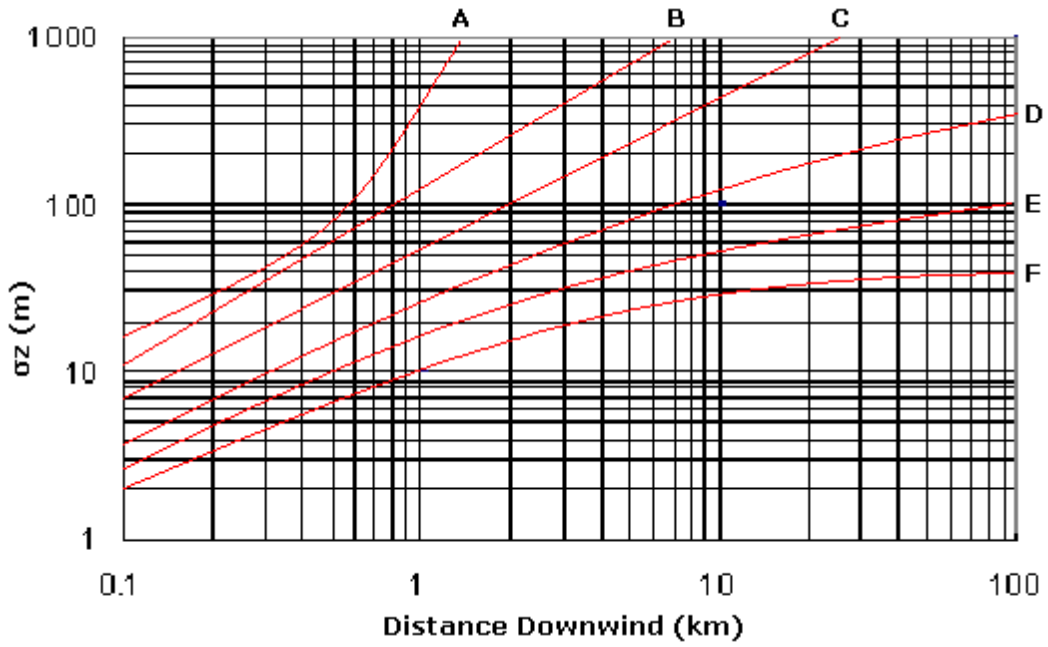
Coeficients de dispersió

Els paràmetres σy i σz són les desviacions tipus en les direccions lateral i vertical respectivament, que representen una mesura de la dispersió del plomall en aquestes direccions. Tals paràmetres són funció de la distància a la font emissora vent baix i de la classe (categoria) d'estabilitat atmosfèrica definida en el punt 4.

Aquests coeficients es solen presentar en forma gràfica o poden calcular segons fórmules empíriques. Diferents autors arriben a expressions que difereixen lleugerament.

A les figures 31 i 32 es mostren uns gràfics àmpliament utilitzats per obtenir les σy i σz, obtinguts a partir de les fórmules de Turner. Aquests gràfics indiquen que per a una determinada distància vent avall de la font d'emissió, l'amplitud del plomall és màxima cunado la inestabilitat atmosfèrica és també màxima i és mínima quan l'atmosfera és molt estable.





Els valors obtinguts per aquests gràfics o per les fórmules que han donat lloc a ells, només són aplicables en camp obert i s'ha de tenir en compte que en condicions inestables (A) i estables (F) es poden cometre errors de diverses vegades en l'estimació de σZ.

Per a condicions d'estabilitat intermèdies entre les anteriors, l'estimació de σZ es pot esperar que com a màxim, es desviï al doble del valor estimat pels gràfics.

6. Anàlisi de risc quantitatiu en pipelines

Les eines necessàries per estimar les conseqüències d'un accident són models matemàtics, basats en dades experimentals o en una anàlisi històrica extens, que permeten fer una predicció fiable d'un accident, així com models de vulnerabilitat, per poder establir la relació dosi-efecte. El reg final es determina multiplicant aquestes conseqüències per la freqüència dels accidents als llarg del temps.

L'objectiu final d'una avaluació de riscos en una instal·lació industrial (planta de procés, canonada que transporta una substància perillosa) propera a un nucli urbà, és establir la distribució del risc en l'àrea afectada mitjançant les anomenades línies d'iso-reg i calcular les seves conseqüències sobre la població, el risc social, mitjançant l'aplicació de valors apropiats de freqüència o de probabilitat; ambdós conceptes s'expliquen en el següent apartat

Conceptes introductoris

Risc

El risc d'un accident es defineix com el producte de la freqüència i la magnitud de les seves conseqüències(Casal,2017):

$$Risc = Freqüència\ x\ Magnitud\ de\ les\ conseqüències$$

Les possibles conseqüències associades són les lesions o morts sobre la població, les pèrdues econòmiques o materials.

No obstant això, es necessita molta feina d'anàlisi per poder establir les conseqüències d'un hipotètic accident. A més, hi ha casos en els quals es superposen múltiples esdeveniments, en els quals hi ha un alt grau d'incertesa.

El resultat d'una anàlisi quantitativa de risc és comunament expressat mitjançant els termes risc individual i el risc social. A continuació es defineixen aquests conceptes, necessaris per a poder realitzar una anàlisi adequada.

Risc individual

El risc individual és el risc al qual està sotmesa una persona que estigui 24 h / dia tots els dies de l'any en els voltants d'una determinada instal·lació (unitats: morts / (persona · any). Aquesta definició inclou la naturalesa de la lesió al individu, la probabilitat que pateixi cadascuna de les lesions i el període de temps durant el qual la lesió es produeix (Casal et al., 1996).

Si el risc individual s'expressa en termes de morts, es pot definir com una funció de les coordenades espacials, el que representarà la probabilitat que un individu situat en un punt durant un període d'un any mori a causa de l'accident produït en una planta industrial, ruta de transport o instal·lació, com podria ser un canonada que transporta una substància perillosa. La unitat usada per expressar el reg individual és l'any-1. Pel que el risc individual en un punt determinat pot expressar-se com:

$$IR_{x,\,y} = \sum_{i=1}^{i=n} IR_{x,\,y,\,i}$$

on,

$IR_{x,y}$= es el risc individual total de mort en un punt geogràfic x, y (probabilitat de mort/any) sota l'escenari accidental i.
n= número total d'escenaris considerats en el anàlisis.

$IR_{x,y}$ s'expressa com una funció de la freqüència y la probabilitat:

$$IRxy = fi \cdot Pfi$$

on,

fi= es la freqüència de que un escenari determinat i es desenvolupi (any^{-1})

P_{Fi}= es la probabilitat de que el escenari accidental ocasioni una mort en el punt x, y.

El valor de PFi s'obté mitjançant l'aplicació de models de vulnerabilitat. fi pot obtenir del producte de la freqüència de l'esdeveniment inicial i de la probabilitat que es produeixi la seqüència d'esdeveniments que condueixen a l'escenari accidental i. De tal manera, fi pot ser calculada mitjançant la següent expressió:

$$fi = fincident \cdot Psequence\ i$$

on,
fincident= es la freqüència amb la que un incident ocorre (any^{-1})
Psequence= es la probabilitat de que es produeixi la sequencia d'events que porten al escenari accidental i

Risc social

El risc social és el nombre estimat de morts per any, mesurat en morts · any-1. Per calcular-lo és necessari conèixer les dades demogràfiques de l'emplaçament analitzat [13].

$$Risc\ social = \int (riesc\ individual) \cdot [densitat\ de\ població\ (x \cdot y)]dx\ dy$$

Quan s'estima el risc social és possible considerar paràmetres específics com l'hora del dia en la qual l'accident passa, la protecció dels individus davant en efecte, etc. (Casal, 2008).

Línies d'iso-risc

Les línies d'iso-risc representen els diferents nivells de risc individual a la zona analitzada, afectada per l'escenari accidental. Una línia d'iso-risc connecta tots els punts geogràfics voltant d'un escenari accidental amb un risc individual del mateix tipus i magnitud semblant, per exemple, tots els punts on la freqüència de mort és aproximadament la mateixa (Casal et al., 1996) .

Per poder traçar una línia d'iso-risc és necessari calcular tots els escenaris accidentals que afectessin cada punt de l'emplaçament: el risc mitjana que resulta és una suma de cada un dels riscos associats amb un determinat escenari accidental.

Per de poder establir les línies d'iso-risc és necessari calcular:

- Els escenaris accidentals que passaran donades unes circumstàncies determinades (pèrdua de contenció d'una canonada, col·lapse i un tanc, etc.),

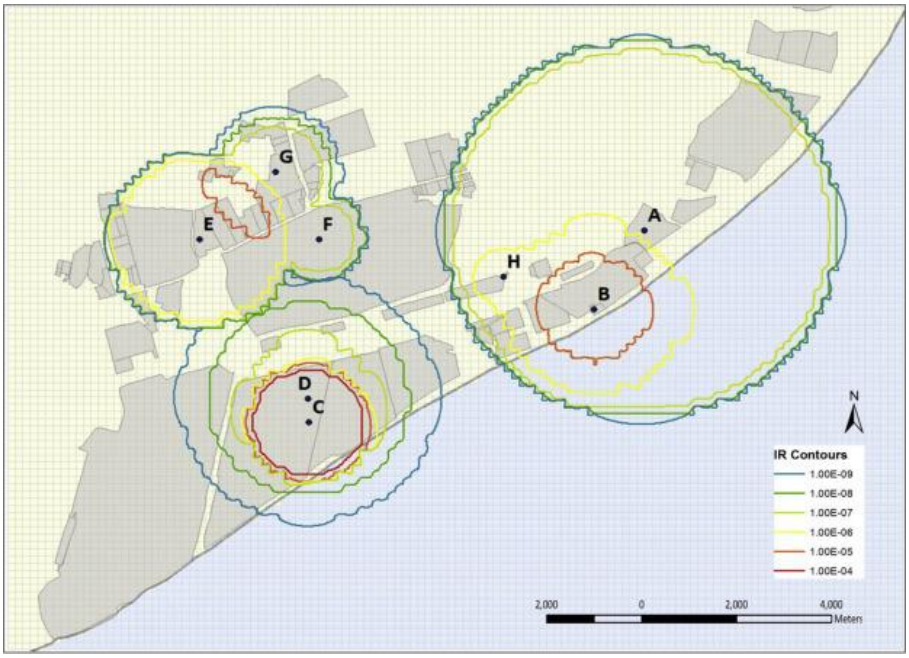
- Les diferents reaccions del sistema davant d'un incident determinat (equip d'intervenció, sistema de detecció de fallades, etc.)

- Les diferents condicions meteorològiques (estabilitat atmosfèrica, velocitat i direcció del vent, grau d'insolació / nuvolositat, etc.)

- Els diferents punts on es pot produir una ignició i la seva freqüència.

La forma de les línies d'iso-risc depèn de la naturalesa física dels efectes accidentals, de les condicions atmosfèriques (direcció i velocitat vent, etc.) i de les característiques del terreny, que seran calculats mitjançant models capaços de simular la forma, mida i característiques dels mateixos, basant-se informació meteorològica, del propi sistema, de la substància involucrada, de l'emplaçament, etc .

Figura 23 Exemple línees iso-risc



6.1. Metodologia de anàlisis

Recollida d'informació rellevant

Dades geogràfiques i demogràfiques

Abans de procedir al càlcul dels efectes de cada escenari accidental s'ha d'estudiar les característiques de l'emplaçament afectat per l'accident i la seva situació geogràfica. també cal estudiar la distribució dels habitants, per poder calcular el dany social. Per a això és necessari proposar un valor de densitat de població. També és possible incloure paràmetres específics com l'hora del dia en la qual l'accident passa, la protecció dels individus davant en efecte, etc., per tal d'elaborar una estimació dels més fiables de les conseqüències d'aquest hipotètic esdeveniment. Aquest valor de densitat demogràfica pot trobar-se en el CTE (Codi Tècnic d'Edificació), on es proposen diferents valors segons l'activitat que es desenvolupa en cada un dels espais. També hi fitxes estadístiques per a determinats barris i municipis, que elabora la Secretaria de l'Estat d'Habitatge i actuacions urbanes, que pertany al Ministeri de Foment, en què es poden trobar dades bàsiques com la població, nombre d'habitatges, densitat de població (pob / km2), superfície, etc., així com indicadors de vulnerabilitat, i altres dades sociodemogràfiques d'interès.

A continuació es mostren alguns exemples de dades d'ocupació per a diferents espais:

Espai		**Ocupació**
Unifamiliars		2.5 habitants/unitat
Propietats plurifamiliars		90 m_2 família
Establiments públics	Botiga de detall	10 persones/unitat
Cafeteria, restaurant		15 persones o unitat
Aparcaments fora de supermercats		10 persones/hectàrea
Aparcaments de grans (> 100 m_2))		60 persones/hectàrea

Dades meteorològiques

Per poder calcular els efectes de l'escenari accidental és necessari realitzar una previsió de les dades meteorològiques que influiran en l'accident com són:

- Temperatura ambient

- Pressió atmosfèrica

- Altitud

- Direcció del vent

- Velocitat del vent

- Condicions d'insolació / nuvolositat.

- Estabilitat atmosfèrica (determinarà la barreja del nostre contaminant amb l'aire i la seva dispersió)

Propietats físiques i químiques del contaminant

Per poder calcular els efectes de l'escenari accidental és necessari estudiar les propietats de la substància o contaminant implicat com són la seva densitat, la massa molar, condicions d'equilibri, punt d'inflamabilitat (flash point), solubilitat en aigua, viscositat, etc ...

Dades tècniques sobre el procés o sistema analitzat

Per poder realitzar una correcta estimació dels efectes de l'accident és necessari conèixer les característiques del sistema implicat. Per a una canonada, les dades d'interès per a definir el problema serien el diàmetre, material, temperatura i pressió d'operació, cabal, metres de profunditat respecte el terra i tipus del sòl (en el cas de canonades subterrànies), etc.

6.1.1. Identificació d'escenaris accidentals

Estudiant la seqüència d'esdeveniments produïts és possible determinar l'escenari o la suma d'escenaris accidentals que ocorreran. Els arbres d'esdeveniments mostren totes les possibilitats d'escenaris que resultarien d'haver-se complert un determinada seqüència d'esdeveniments i característiques. A la imatge 49 de l'annex es mostra un exemple d'un arbre d'esdeveniments accidentals per a gasos liquats pressuritzats.

6.1.2. Estimació de la freqüència

La freqüència d'un possible escenari accidental serveix per quantificar de manera breu i resumida la quantitat d'accidents que podrien ocórrer en un determinat període de temps en la instal·lació analitzada. El període utilitzat generalment és un any. La freqüència d'un possible escenari accidental ve donada segons la següent equació:

$$F_{escenari\ accidental}[accidentsany] = F_{fuita}[accidentskm \cdot año] \cdot\ L_{tram}[km] \cdot P_i$$

on:

$F_{escenari\ accidental}$ = Freqüència anual d'escenari accidental "i".

F_{escape} = Freqüència estimada para la fuita en el conducte.

L_{tram} = Longitud del tram de canonada en la qual l'incident tindrà efectes sobre l'objectiu vulnerable a analitzar.

P_i= Probabilitat de que se den las circumstàncies requerides (probabilitat de inflamació, Direcció del vent, etc.)

A continuació se explica cóm procedir para obtenir o calcular cada un de aquests factors.

Freqüència d'escapament

La freqüència d'escapament expressa la possibilitat que es produeixi una pèrdua de contenció per quilòmetre de canonada i any. Basant-se en anàlisis històriques d'accidents, algunes bases de dades

com el GESIP o manuals com el Bevi, proposen valors de freqüència d'escapament per a canonades segons les seves característiques (diàmetre, subterrània, material, etc.)

Atès que la freqüència d'escapament ve donada per any i per km, cal establir una longitud de canonada en la qual l'escenari accidental considerat pot afectar a l'objectiu, anomenat tram d'interès o de tram anàlisi.

Tram d'anàlisi

Per realitzar l'anàlisi quantitativa de riscos d'una canonada és necessari delimitar el segment en el qual l'escenari accidental considerat pot afectar a l'objectiu considerat. Aquest es pot calcular de manera aproximada mitjançant un mètode gràfic. Aquest mètode consisteix a establir cada un dels extrems del tram d'anàlisi en el punt en el que l'abast del fenomen pugui afectar a l'objectiu vulnerable d'estudi. A la següent imatge es mostra un exemple.

Probabilitat dels diferents escenaris accidentals en cas d'ignició

La probabilitat que es produeixi la seqüència d'esdeveniments que condueixen a l'escenari accidental pot trobar-se en bases de dades, o en articles, basats en dades experimentals o més comunament en una anàlisi històrica d'accident. Per al cas que en aquest estudi es planteja el valors de probabilitat han estat extretes de l'article Conditional Probabilities of post-release events for Hazardous materials pipelines realitzat per Bubbico et al. (2016), on es proposen dades de probabilitats davant l'ocurrència de certs escenaris accidentals després de l'abocament de substàncies perilloses, basant-se en l'anàlisi de 1063 accidents i incidents ocorreguts a tot el món. (Vegeu Fig. 49 a l'annex)

Anàlisi d'efectes i conseqüències

Un cop s'ha recol·lectat tota la informació rellevant es pot procedir al càlcul d'efectes d'un escenari accidental així com les seves conseqüències quan aquests arribin als elements vulnerables a analitzar (habitants, edificis, instal·lacions, etc.)

Estimació dels efectes

Són diverses les opcions a l'hora d'estimar els efectes d'un determinat esdeveniment accidental. D'una banda hi ha models matemàtics, basats en dades experimentals o en una anàlisi històrica extens, que permetin realitzar una predicció fiable d'un accident en base a uns paràmetres. Alguns exemples d'aquests mètodes analítics serien el model del cos sòlid, que calcula li intensitat de la radiació tèrmica en un punt determinat, o el mètode del TNT equivalent que permet predir de forma ràpida i senzilla els danys ocasionats per una explosió a partir de la massa de TNT (trinitrotoluè) que equivaldria a la quantitat d'hidrocarbur implicat, és a dir, que ocasionaria el mateix nivell de danys.

D'altra banda existeixen programaris de simulació escenaris accidentals, com ALOHA®, basats en models matemàtics, que permeten establir de manera ràpida i senzilla els efectes d'un determinat esdeveniment donades unes determinades condicions meteorològiques.

L'objectiu final és establir la distribució del risc en l'àrea afectada, les anomenades línies d'iso-reg, dividint l'emplaçament on l'efecte tindrà abast en zones amb el mateix tipus risc individual i magnitud semblant.

Un cop s'han establert les línies d'iso-risc és possible calcular les conseqüències sobre l'objectiu considerat en base a models de vulnerabilitat com el probit, explicats en el següent tema.

6.1.3. Estimació del risc individual i social

Per calcular el risc individual que rebrà un individu davant l'abast d'un efecte s'han d'aplicar els càlculs d'estimació dels efectes (grandària, forma, intensitat) sobre l'emplaçament estudiat, on s'ha establert una determinada distribució d'habitants. En base als valors de risc individual establerts es pot calcular el risc social o nombre total de morts. A la següent figura es mostra un nucli urbà amb una població uniformement distribuïda i l'abast d'una flamarada o flashfire, amb el seu corresponent risc social.

Un cop s'ha realitzat aquest estudi amb cadascuna dels esdeveniments considerats, es pot

procedir a calcular les diferents zones de risc individual dins de l'emplaçament afectat.

Si se superposen els efectes s'obtenen diferents zones de risc individual. Cadascuna de les

zones individuals és una funció dels efectes de cada un dels esdeveniments considerats. en

unes zones únicament es donarà un únic efecte i en altres es pot donar la superposició de fins

tres efectes.

Una vegada s'ha determinat cada una de les zones de risc individual es possible calcular el seu valor, realitzant la suma de cada un dels riscos individuals que contribueixen per a cada zona determinada.

$$RI_x = \Sigma\, frequencia_{escenari\ i} \cdot probabilitat\ de\ mort_{escenari\ i}\ i = n\ i = 1$$

on,

RI_x = risc individual a la zona de risc “x” (mortss · any^{-1})

$frequencia_{escenari\ i}$= es la freqüència amb la que l'incident o esdeveniment inicial passa (año^{-1})

$probabil$itat $de\ mort_{escenario\ i}$= es la probabilitat de que es produeixi una seqüència d'esdeveniments que condueixen a l'escenari accidental i (-)

Zona	Escenari accidental	IR, any-1
I	Flamarada + ΔP(e.directe + e.indirecte), S	4,8·10-5
II	ΔP, efectes indirectes, S	8·10-6
III	Flash fire + efectes indirectes ΔP, S	3,3·10-5
IV	ΔP(e.directe + e.indirecte),S	2,4·10-5
V	Flamarada	2,4·10-5

Taula 5 Taula d'IR

A continuació es calcula el conegut "risc social", es a dir, el número de víctimes mortals per any. Per dur-ho a terme s'ha de considerar el número de morts asociades a cada escenari accidental, i també la freqüència de cada escenari.

Escenari accidental	*f, any-1*	Número de morts, N
Flamarada, S	2,4·10-5	150
Flamarada + ΔP, S	1,6·10-5	187
Flamarada, SE	3,3·10-5	30
Flamarada + ΔP, SE	7,7·10-5	45

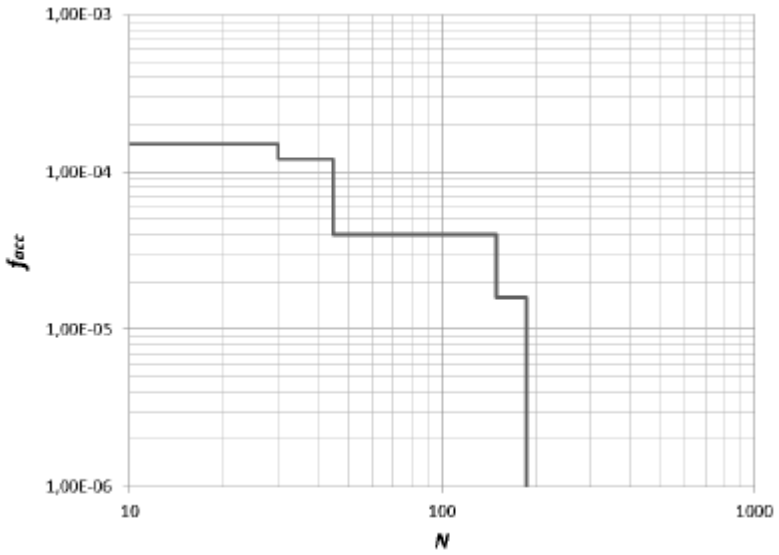
Taula 6 Freqüències i número de morts

Representació de les línees f-N

Les línies f-N són comunament utilitzats per representar el risc social. Per representar les línies f-N és necessari calcular el nombre de morts associats amb cada escenari accidental, així com la freqüència en què aquestes es produeixen (Casal et al., 1996). Per això, risc social a la taula anterior dades ha de ser ordenada per disminuir el nombre de morts, així com calcular la freqüència acumulada per a cada un dels escenaris, de la manera següent.

Número de morts	**Escenari accidental**	***f, any-1***	f_{ac}, any^{-1}
>187	Cap	0	0
187	Flamarada + ΔP, S	1,6·10-5	1,6·10-5
150	Flamarada, S	2,4·10-5	4,0·10-5
45	Flamarada + ΔP, SE	7,7·10-5	1,2·10-4
30	Flamarada, SE	3,3·10-5	1,5·10-4

Taula 7 freqüència i número de morts



Taula 8 Representació Risc social

7. Anàlisis de conseqüències: Models de vulnerabilitat

Un cop ja s'han calculat els efectes d'un accident - radiació tèrmica, ona de sobrepressió, concentració d'una substància tòxica - es procedeix a estimar les seves conseqüències quan aquests arribin a una persona, immobles de la zona, medi ambient, instal·lacions, etc. Aquesta anàlisi de conseqüències es pot realitzar mitjançant dades tabulades o els anomenats models de vulnerabilitat.

El resultat d'aquesta anàlisi es tracta d'una altra aproximació, la validesa dependrà únicament de la seva correcta aplicació dels models que intervenen i del bon criteri de l'analista.

Un dels mètodes més comuns en l'anàlisi de conseqüències d'accidents industrials és el "anàlisi probit".

7.1. Anàlisi probit

Per realitzar una estimació de les conseqüències es requereix una funció que relacioni la magnitud de l'impacte amb el grau de dany que aquest provoca; és a dir, una relació establerta per a tal efecte de dosi-resposta. El mètode cada vegada més usat és l'anàlisi probit, que relaciona les variables probit, procedent de l'anglès probability unit amb la probabilitat en percentatge de població afectada (Casal et al., 1996).

La variable probit, I, és una mesura del percentatge de la població vulnerable sotmesa a un fenomen perjudicial d'una intensitat determinada (V) que rep un dany determinat.

La relació entre la variable probit (I) i la probabilitat P és la següent:

$$P = \frac{1}{\sqrt{2p}} \int_{-\infty}^{Y-5} \exp\left[-\frac{V^2}{2}\right] dV$$

Normalment, la probabilitat (que varia de 0 a 1) és substituïda pel percentatge (de 0 a 100), més pràctic per a l'anàlisi d'afectats. La relació entre el percentatge i la variable probit (I) es pot veure a la Fig. 38 i en Taula 13, on es troben els seus valors tabulats. Per a la seva aplicació se sol utilitzar la següent equació:

Y=a+blnV

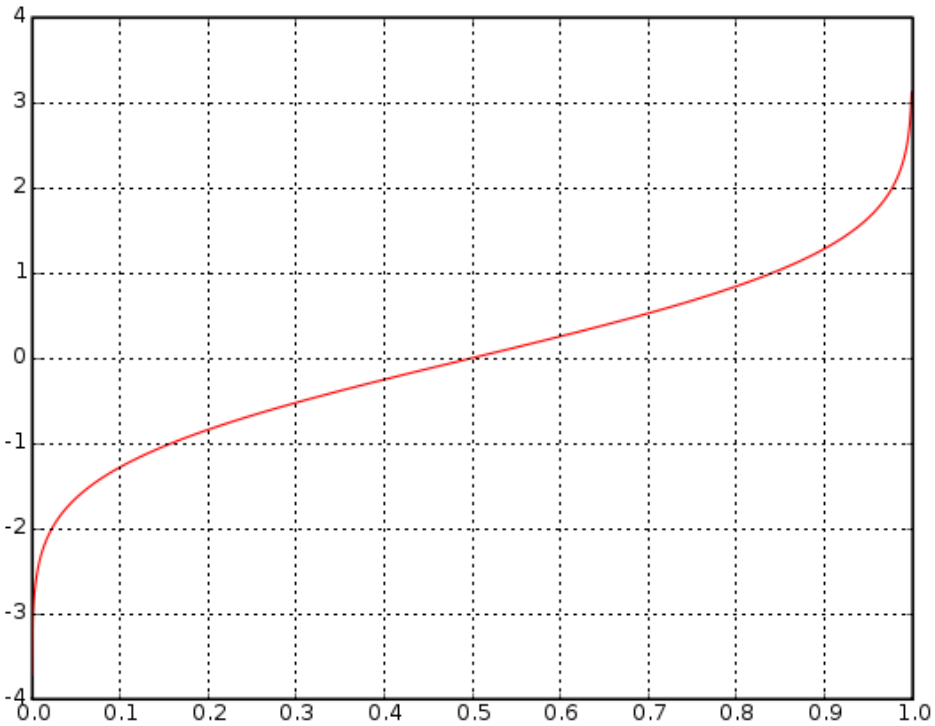
On a i b són constants que es determinen experimentalment a partir de la recollida d'informació d'accidents, i en determinats casos, de l'experimentació amb animals. La variable V, és una mesura

de la intensitat del que pot causar el dany, podent ser constituïda per un sol paràmetre (per exemple, una sobrepressió) que pot ser una funció de diverses variables (per exemple, una combinació de concentració i temps). Aquesta equació permet, a partir dels efectes d'un accident (radiació tèrmica, ona de sobrepressió, dosi de producte tòxic), obtenir de forma pràcticament directa el percentatge de morts o ferits d'una determinada lesió (trencament del timpà, cremades de tercer grau , etc.).

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

Taula 9 Relació entre el probit i percentatge

Figura 24 Relació entre variable probit i percentatge



Un cop s'ha aplicat d'aquest percentatge sobre la població afectada per l'accident (establerta prèviament en la definició de l'escenari accidental) es pot estimar el nombre de víctimes.

7.1.1. Vulnerabilitat a la radiació tèrmica

Les conseqüències de la radiació tèrmica sobre la pell són la denominades cremades, la gravetat de les quals depèn de la intensitat de la radiació (kW m-2) i de la dosi rebuda (temps d'exposició). Segons la seva profunditat, les cremades es classifiquen en:

- Cremades de primer gat: afecten l'epidermis, que resta enrogida però sense formació de butllofes, provoca mal de poca intensitat.

- Cremades de segon grau: poden ser superficials o profundes i provoquen l'aparició de butllofes.

- Cremades de tercer grau: afecten tot el gruix de la pell, la qual és destruïda.

L'existència de cremades en una superfície important del cos, amb la destrucció o degradació conseqüents, provoca la pèrdua de fluid i augmenta extraordinàriament el risc d'infeccions. L'esperança de vida d'un cremat està condicionada per l'extensió de la superfície del cos afectada per cremada de segon i tercer grau.

La taula següent, mostra els nivells de dany aproximats per a diversos valors de fluxos tèrmics.

Radiació térmica kW · m^{-2}	Efecte
1,4	Es considera inofensiu sense cap mena d'efecte
1,7	Mínim necessari per causar dolor
2,1	Mínim necessari para causar dolor després de 1 minuto.
4,0	Suficient pera causar dolor en una exposició de 20 s; cremades de primer grado.
4,7	Causa dolor en 15-20 s, ferides despeés de 30s.
12,5	100% letal. Fusió del plàstic en els cables elèctrics.
37,5	Suficient per causar dany a qualsevol equip. Colapse d'estructures

Taula 10 Danys aproximats per a diferents fluxos

Existeixen varies ecuacions probit per estimar les conseqüències de la radiació tèrmica sobre persones. A continuació s'exponen algunes:

Cremada de primer grau: y= −39,83+3,0186ln ($t \cdot q_{4/3}$)
Cremada de segon grau: y= −43,14+3,0186ln ($t \cdot q_{4/3}$)
Cremada de tercer grau: y= −36,38+2.56ln ($t \cdot q_{4/3}$)
on,
t = temps d'exposició (s)

q = intensitat de la radiació ($W \cdot m^{-2}$)

Si la persona està vestida, la situació variarà. La roba protegeix de la radiació sempre que aquesta no es peça; si es pren, la seva combustió provoqués cremades de gravetat, amb una elevada probabilitat de mort. Si el vestit no es crema, la seva presència reduirà la superfície de la pell exposada: en general, es considera que només un 20% d'aquesta superfície és irradiada; això comprèn el cap (aproximadament el 7% de la superfície del cos), les mans (5%) i els braços (8%). No obstant això, tenint en compte la distribució d'edats de la població i la seva mortalitat diferent, malgrat l'efecte protector de la roba, amb cremades importants de 20% de la superfície del cos, aproximadament un 14% de la població exposada a la radiació moriria (Casal et al., 1996).

A continuació es mostra una equació probit que calcula la població afectada per la radiació tèrmica amb cremades greus com a conseqüència tenint en compte la protecció del vestit.

$$y = -37{,}23 + 2{,}56ln(t \cdot q^{\frac{4}{3}})$$

Per al cas de la flamarada (flash fires), es consideren dues possibilitats:

- Població i objectes fora del núvol de vapor: estan sotmesos a radiació, però com el seu durada (dosi) és molt curta, el dany no és considerable.

- Població i objectes dins del núvol de vapor: sotmesos al contacte directe amb la flamarada. Les persona rebran cremades greus sobre una part important del cos, la situació s'agreuja si es pren el vestit; la probabilitat de mort és molt alta. En el cas de les persones situades a l'interior dels edificis estaran exposades de la mateixa manera a focs secundaris generant cremades molt greus. A causa de l'exposat, per al cas que aquí es planteja s'ha considerat un letalitat total per contacte de la flamarada.

Vulnerabilitat a les explosions

Quan una explosió passa, es produeix una ona de sobrepressió, idealment de geometria circular, que avança en la seva trajectòria des del centre fins als voltants perdent intensitat. Quan l'ona arriba a una persona, animal, objecte o un edifici, depenent de la seva intensitat en aquest punt, que al seu torn dependrà de la magnitud de l'explosió i de la distància de l'epicentre en la qual les es troben, generés un dany, de major gravetat com més gran sigui el valor de sobrepressió.

7.1.2.1. Danys sobre la població

Els danys provocats per les explosions poden classificar-se en dos grups:

- Danys directes deguts a la sobrepressió

El cos humà és molt resistent a una sobrepressió, atès que gran part de la seva constitució és aigua, un fluid no compressible. Per tant, els danys directes tindran lloc essencialment en aquelles parts del cos susceptibles de ser aixafades, és a dir, en els espais buits com podrien ser la caixa pulmonar, la cavitat auditiva, etc.

Les pitjors situacions són aquelles en què el cos es troba prop d'una superfície plana perpendicular a la direcció de propagació de la sobrepressió. Les sobrepressions més altes es donen quan el cos humà té el seu eix longitudinal perpendicular a la direcció de propagació de la sobrepressió, la qual cosa és molt probable. Finalment, el menor impacte és quan l'eix longitudinal del cos es troba en la mateixa direcció que la propagació de l'ona de sobrepressió (Casal et al., 1996).

A continuació es proposa les dues equacions probit més usades per a l'anàlisi de conseqüències d'una sobrepressió.

A. Mort per hemorràgia pulmonar

La mortalitat per hemorràgia pulmonar provocada per l'aixafament de la caixa toràcica es pot estimar utilitzant l'equació probit proposta per Eisenberg et al., (Casal et al., 1996).

$$Y = -77{,}1 + 6{,}91 \ln \Delta P$$

B. Ruptura del timpà

Un altre efecte directe és el trencament del timpà. En un estudi realitzat per Hirsch (1968) amb la correlació amb dades procedents de diversos autors es proposat la següent equació probit, comunament usada en l'actualitat (Casal et al., 1996).

$$Y = -12{,}6 + 1.524 \ln \Delta P$$

Efectes indirectes

A. Desplaçament del cos

La sobrepressió pot provocar que un cos es desplaci i posteriorment xoc contra el terra o bé amb algun obstacle (paret, equip); en aquest xoc pot produir un dany sobre l'individu.

Depenent de si l'individu xoca amb el cap, podent-se generar una fractura cranial, o no, les conseqüències varien.

A la següent taula es mostren els criteris de mortalitat proposats pels danys indirectes sobre el cap, dades proposades per White i Clemenson (1968), i sobre el cos, White (1971) ..

Velocitat del impacte, m/s		
Criteri de mortalitat	Impacte al cap	Impacte al cos
Segur	3	3
Umbral	4	6,5
50%	5,5	16,5
100%	7	42

S' ha proposat les següent equacions pròbit.
- **Impacte al cap**

Y=5−8,49ln$S$
Calculant-se mitjançant la següent equació: $S = 2430\Delta P + 4 \cdot 10^{8} \cdot \Delta P \cdot i$
on,
i = impuls de l' ona de sobrepressió (N·m2s)
ΔP= sobrepressió màxima (N·m-2)

- **Impacto en el cuerpo**

Y=5−2,44ln$S$

Calculant-se mitjançant la següent equació: $S = 7380\Delta P + 1{,}3 \cdot 10^{9} \cdot \Delta P \cdot i$

B. Efectes de fragments

Un altre dels efectes secundaris de les explosions és l'impacte de fragments contra el cos, que poden ser objectes despresos per l'explosió o cossos que l'ona de sobrepressió s'ha desplaçat al llarg de la seva trajectòria. Hi ha poques dades fiables sobre els efectes de l'impacte d'objectes contra el cos.

Depenent de la velocitat a la qual viatja l'objecte es poden donar diferents graus de danys. En un estudi en el qual s'analitzava el dany al cap o la columna vertebral davant l'impacte d'un objecte no penetrant de 4,5 kg es va concloure el següent

Velocitat d' impacte, m/s	**Criteri de dany**
3	Umbral de seguretat
4,5	Dany probable
7	Dany segur

Així mateix, en un altre estudi es van analitzar els danys ocasionats per l'impacte d'un fragment de vidre de 10 grams (objecte penetrant) concloent-ho següent.

Velocitat d'impacte, m/s	Criteri de dany
15	Umbral de ferides cutànies
30	Umbral de ferides greus
55	50% ferides greus
90	100% ferides greus

C. Destrucció d'habitatges

Quan un edifici es destrueix per acció d'una ona de sobrepressió una part de les persones que hi perden la vida. La vulnerabilitat en aquest accident varia amb l'edat i el sexe. En general, els nens i la gent gran tenen menys probabilitat de sobreviure.

Tot i que les conseqüències varien segons el tipus d'edifici i grandària, en general, es considera que l'esfondrament d'un edifici genera un 20% de morts i un 80% de ferits.

DANYS SOBRE ELS EDIFICIS I EQUIPS

El dany ocasionat per l'ona de sobrepressió depèn, com sempre, de la sobrepressió màxima i de l'impuls, però també de les circumstàncies: confinament, estat de les parets (esquerdes), anys de l'edifici, etc.

Hi equacions probit que poden ajudar a predir els danys greus davant l'ensorrament d'edificis, en funció de l'impuls de l'ona de sobrepressió.

En la taba mostrada a continuació es donen valors aproximats que relacionen el dany provocat sobre edificis i equips davant d'un determinat valor de sobrepressió màxima.

Pressió (bar)	Danys
0,0014	Soroll molest (137 dB) si es de baixa freqüència (10-15 Hz) .
0,0021	Possible ruptura de cristalls grans sotmesos a tensió.
0,0028	Soroll fort (143 dB) .
0,0069	Ruptura de petites finestres sotmeses a tensió.
0,010	Pressió típica de ruptura de cristalls
0,020	95% de probabilitat de no rebre danys seriosos. Límit per la projecció de fragments.
0,028	Petits danys estructurals
0,034-0,069	Ruptura de finestres i suports
0,048	Danys estructurals en edificis
0,069	Demolició parcial de les cases.
0,090	Distorsió de las bigues d'acer.
0,138	Col·lapse parcial de las parets y sostres de las cases.
0,159	Límit inferior per danys estructurals seriosos.
0,172	50% de destrucció de les construccions de totxana.
0,207	Danys menors en maquinaria pesada (1.500 kg). Les estructures de acer dels edificis s'arrenquen dels seus ciments.
0,0345-0,483	Destrucció casi total de vivendes
0,689	Probable destrucció total de los edificis.

8. Aplicació de l'anàlisi quantitativa de riscos a una canonada de GLP (propà)

8.1. Objectiu

Es vol analitzar el risc associat a la perforació d'un conducte que transporta gas liquat de petroli (GLP, propà), considerant les conseqüències originades per la ignició retardada del núvol tòxic, la consegüent flamarada (Flash Fire) i eventualment l'explosió (Vapor Cloud Explosion) sobre la població afectada (és a dir, situada dins de l'abast dels efectes físics).

És a dir, s'han de modelitzar i calcular, en base a unes condicions determinades al lloc de l'incident, els fenòmens originats pel fet que aquest núvol tòxic entri en contacte amb un punt d'ignició, sent la flamarada i l'explosió de la núvol de vapor efectes contemplats i analitzats. Un cop dimensionats, es quantifiquen els riscos sobre la població d'un hipotètic nucli urbà confrontant amb la canonada.

8.2. Plantejament

8.2.1. Incident a considerar.

Perforació del conducte subterrani amb el consegüent abocament i formació d'un núvol inflamable. La canonada està situada a una distància de 10 m d'un nucli urbà al punt més proper a aquest. El conducte transporta gas liquat de petroli.

8.2.2. Característiques de l'emplaçament afectat per l'accident.

- Situació de l'accident: Per caracteritzar correctament el problema s'ha triat com hipotètic nucli urbà implicat en l'accident al barri Sant Crist a Badalona.

A la Fig. 40 es mostra la situació de l'emplaçament (nucli urbà) implicat en l'accident (marcat en vermell) i un gran supermercat, sent aquest i la zona residencial els dos tipus d'espais (segons el seu ús) que s'han considerat.

- Ocupació de l'emplaçament afectat:

Per tal d'establir uns valors d'ocupació per als espais del nucli urbà a estudiar, aquest ha estat dividit en dos espais, segons l'activitat que es desenvolupa en ells. Els dos espais han estat Zona d'habitatges i Centre comercial. La densitat d'ocupació al centre comercial, marcada en blau a la Fig. 40 s'ha

establert segons la NTP 884. Sobre la base del codi tècnic d'edificació sobre l'evacuació d'edificis en cas d'incendi, s'estableixen diferents densitats d'ocupació per a cada espai segons l'activitat que en ell es desenvolupi [9]. La resta de l'emplaçament s'ha considerat com espai de densitat d'ocupació uniforme; aquesta ocupació s'ha establert segons una Fitxa tècnica publicada per la Secretària d'Estat d'Habitatge i Actuacions Urbanes, pertanyent al ministeri de Foment, en el qual figura el nombre d'habitants per quilòmetre quadrat a la zona d'estudi.

Figura 25 Imatge del barri de Sant Crist amb les delimitacions

	Àrea	Habitants
	Hectàrees	Núm. Habitants
Barri Sant Crist, Badalona	4,85	3659

8.2.3. Condicions atmosfèriques

A la taula mostrada a continuació es mostra les condicions atmosfèriques en les quals ocorre l'incident. (Les dades han estat preses el dia 17/01/2018)

Temperatura ambient	15ºC
Velocitat del vent	2 m/s
Direcció del vent	E
Humitat relativa	50% (cel parcialment covert)
Estabilitat atmosfèrica	B

8.2.4. Característiques del conducte

Les característiques triades per a definir el conducte implicat son.

-Diàmetre de la canonada que intervenen: segons els valors que tenien més freqüència d'incidents segons la EGIG, sent 40" que és l'equivalent a 1 m de diàmetre nominal de la canonada hipotètic implicat en l'incident s'ha escollit el diàmetre de la canonada.

-Freqüència del conducte escapament = $7{,}475 \cdot 10^{-5}$ $km^{-1} \cdot any^{-1}$. Aquesta figura va ser proposat per la la base de dades EGIG. Aquest valor Mostra la probabilitat anual de 1 km de canonada es produeix un forat de diàmetre considerable, prou com per crear una pèrdua significativa de contenció d'una substància inflamable.

-Longitud del tram d'anàlisi: la secció d'interès és un en què l'escenari accidental considerada pot afectar l'objectiu de considerar. Això es pot calcular aproximadament per un mètode gràfic. Aquest mètode consisteix en establir cada un dels extrems de la secció d'anàlisi en el punt en què l'abast del fenomen pot afectar l'objectiu d'estudi vulnerable. En el cas del barri de Sant crist el tram de la canonada passa per l'autopista així doncs tot el tram inferior-dreta del barri es equivalent alt tram d'anàlisi, el que equival a 284 metres.

8.2.5. Propietats de la substancia implicada

La substància implicada en l'hipotètic accident que es planteja és el propà o gas liquat de petroli (GLP), comunament transportat mitjançant canonada. El propà es tracta d'una substància extremadament inflamable, amb una temperatura d'inflamabilitat molt baixa, al voltant dels 169 K (-104 ° C). La seva densitat és més gran que la d'altres gasos transportats com el gas natural la qual cosa és molt important des del punt de vista de la possibilitat que es creï un núvol inflamable arran de terra que sigui capaç de provocar conseqüències sobre els habitants del nucli urbà confrontant, sent per tant un escenari de gran interès des del punt de vista de l'anàlisi de riscos.

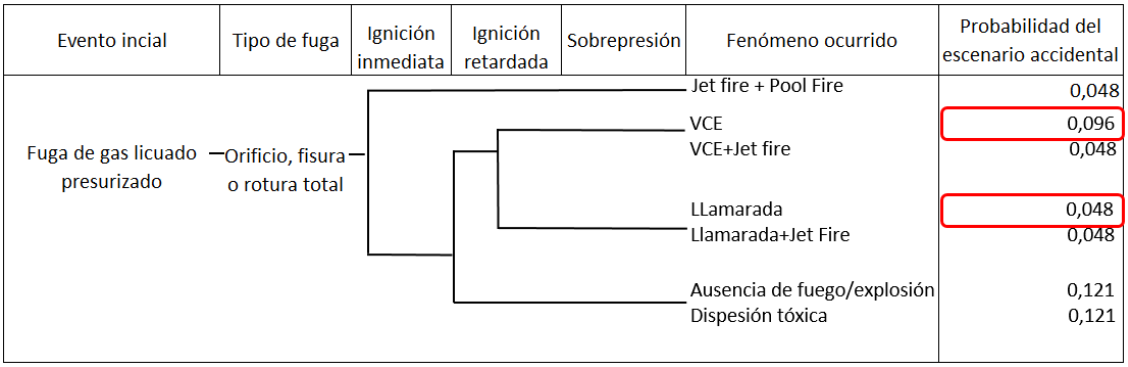
A continuació es mostren les propietats de la substància implicada:

Nom IUPAC	Propà
Fórmula	CH3CH2CH3 (C3H8)
Aparença	Incolor
Densitat	1,83 kg/m3
Massa molar	44 g/mol
Punto de fusió	85,5 K (-188 °C)
Punto de ebullició	231,05 K (-42 °C)
Viscositat	0,2 cP (-40 °C)
Solubilitat en agua	80 mg/l a 20 °C
Flash point	169,15 K (-104 °C)

A través de la base de dades de NIST, s'ha obtingut els paràmetres per a l'equació d'Antoine (annex II). A partir de l'equació obtenim la pressió necessària per a 15 graus i dona 8,6 bar de pressió.

8.2.6. Probabilitat dels diferents escenaris accidentals en cas d'ignició

Els valors de probabilitat de cada escenari accidental en cas d'ignició han estat presos de l'article "Conditional Probabilities of post-release event for Hazardous materials pipelines" (Bubbico et al. 2015), en el qual es proveeixen dades de probabilitats davant l'ocurrència de certs escenaris accidentals després de l'abocament de substàncies perilloses, basat en l'estudi de 1063 accidents i incidents ocorreguts a tot el món.



Per tant els valors de probabilitat per els escenaris accidentals són:

-Explosió de núvol de vapor=0.096

- Flamarada (Flash fire)=0.048

8.2.7. Probabilitat de mort

Probabilitat de mort per flamarada

Per a una flamarada, es considera que tots els individus aconseguits per la flama moriran. La probabilitat de mort davant l'abast d'una flamarada és de 0 o 1: 0 per a aquells que es troba fora de la zona coberta per les flames i 1 per als afectats per les mateixes.

Probabilitat de mort per ona de sobrepressió

A causa dels diferents valors de pressió l'ona de sobrepressió pren al llarg de la seva trajectòria, sempre de menys a més, cal establir dues zones de risc.
A causa dels diferents valors que l'ona de sobrepressió pren al llarg de la seva trajectòria, decreixent en funció de la distància al punt de l'explosió, cal establir dues zones de risc.

- Zona d'efecte directe: Es tracta de la zona que va des del centre del que explosió, el punt d'ignició, fins a un valor de pressió mínima establert sota la qual l'índex de mortalitat és del 100%. En les anàlisis quantitatives de risc estàndard, s'acostuma a adoptar com a valor llindar per letalitat 100% per sobrepressió 0,3 bar. Això comprèn tant efectes directes (interacció directa de la sobrepressió amb una persona) com indirectes (mort per esfondrament de cases, fragments, etc.

- Zona d'efecte indirecte o d'ensorrament d'habitatges: Per realitzar un càlcul conservador, s'ha considerat el valor típic de 50% de letalitat davant l'ensorrament d'habitatges.
Les equacions Probit usualment utilitzades són les següents:

8.3. Càlcul de conseqüències

8.3.1. Estimació de freqüència

$$F_{escenari\ accidental}[accidents/any] = F_{fuita}[accidents/km \cdot año] \cdot\ L_{tram}[km] \cdot P_i$$

Segons l'equació anterior es calculen les freqüències anuals per els dos possibles escenaris

-Ona de sobrepressió

$$F_{escenari\ accidental} = 7{,}475 \cdot 10^{-5} \left[\frac{accidents}{km} \cdot año\right] \cdot\ 0{,}28[km] \cdot 0{,}096$$
$$= 2{,}01 \cdot 10^{-6} \left[\frac{accidents}{any}\right]$$

-Flamarada

$$F_{escenari\ accidental} = 7{,}475 \cdot 10^{-5} \left[\frac{accidents}{km} \cdot año\right] \cdot\ 0{,}28[km] \cdot 0{,}048$$
$$= 1{,}01 \cdot 10^{-6} \left[\frac{accidents}{any}\right]$$

8.3.2. Càlcul de la mortalitat

-Flamarada

A continuació es mostra l'àrea afectada per una Flashfire sobre el objecte d'estudi .

Figura 26 Àrea afectada per flashfire

$$Morts = Area \cdot Ocupació \cdot \ Pmort$$

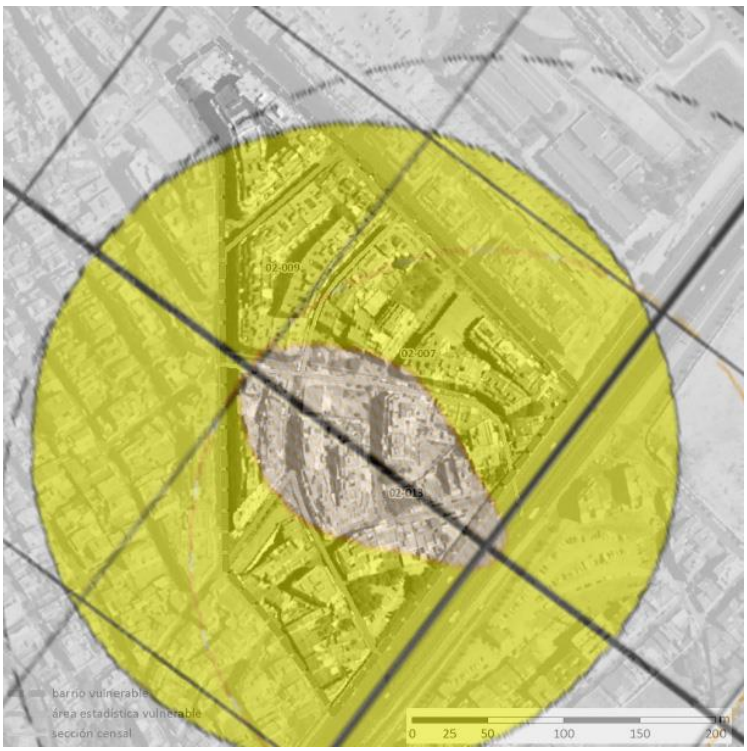
$$Mzbarri = 40.000m^2 \cdot \frac{1\ hectarea}{10000m^2} * \frac{3695habitants}{4.85hectarèes} * 1 = 3047\ morts$$

En el càlcul s'ha considerat l'ocupació total del barri. És a dir no es tenen en compte els factors l'evacuació per cap raó.

-Ona de sobrepressió

A continuació es mostra la zona afectada per l'ona de sobrepressió, donades les condicions de pèrdua de contenció. Amb el simulador ALOHA s'han obtingut les línies d'iso-risc en funció dels valores de pressió que la ona de sobrepressió obté.

Figura 27Area afectada per ona de sobrepressió



Morts per efecte directe(Zona central)

Seguint l'equació de l'apartat anterior:

$$MVCE\ e.d = 31.457m^2 \cdot \frac{1\ hectarea}{10000m^2} * \frac{3695habitants}{4.85hectarèes} * 1 = 2963\ morts$$

Morts per efecte indirecte(Zona 2)

En aquests cas l'ona de sobrepressió arriba a diferents barris així que es suposa només la zona en qüestió:

$$Mzbarri = 45.312m^2 \cdot \frac{1\ hectarea}{10000m^2} * \frac{3695habitants}{4.85hectarèes} * 0.5 = 1726\ morts$$

8.3.3. Aplicació de l'anàlisi probit

A continuació es mostra l'aplicació de l'anàlisi pròbit per l'efecte directe d'una sobrepressió. L'objectiu final és establir el percentatge de població afectada per mort a causa del aixafament pulmonar com també el percentatge de població afectada pel trencament del timpà auditiu. Per a això ha estat necessari calcular la el valor de sobrepressió a cadascuna de les distàncies respecte l'epicentre de l'explosió, la qual cosa ha estat possible gràcies al programari de simulació d'escenaris accidentals ALOHA®, que permet calcular el valor de sobrepressió en un punt determinat

7.3.3.1 Mort per lesions pulmonars

Per a calcular el percentatge de morts per lesions pulmonars s'aplica l'equació probit d'Eisenberg:

$$Y = -77{,}1 + 6.91 ln \Delta P$$

Obtenint els següents resultats:

Distància del epicentre (m)	**ΔP (N/m2)**	**Y**	**% Población afectada**
25	374385,3	11,5763117	100%
50	247521,7	8,71704192	100%
75	168232,1	6,04871998	85%
100	130310,9	4,28375783	24%
125	107558,2	2,95779076	2%

Per el càlcul de la població afectada per el trencament de timpà auditiu a causa de la sobrepressió s'aplica l'equació de probit, obtinguda per Hirsch

$$Y = -12{,}6 + 1.524 ln \Delta P$$

Distància del epicentre (m)	**ΔP (N/m2)**	**Y**	**% Población afectada**
25	374385	6,957	97,4%
50	247521	6,327	90,6%
75	168232	5,738	77,0%
100	130310	5,349	63,5%
125	107558	5,057	52,2%

9. Conclusions

S'ha exposat una visió general de la importància del sistema de transport de substàncies per canonada comparant amb els altres mètodes usats per al seu transport, també s'ha vist l'ús de les canonades a nivell mundial i el seu creixement i decreixement de l'accidentalitat; encara que segueixi decreixent segueix tenint un alt nombre d'accidents.

A mesura que els recursos disminueixen, els països i companyies de gas i petroli i la societat en general depenen més de les importacions procedents de diversos punts del planeta, produint-se un creixement continu dels quilòmetres de canonada de transport instal·lats.

S'ha pogut observar com les bones pràctiques en el disseny de projectes de línies de canonades de transport de substàncies perilloses, especialment l'aplicació de l'anàlisi quantitativa de riscos, estan ajudant atenuar el nombre d'accidents, a més s'ha pogut observar que amb un bon anàlisi de les causalitats d'accidents es pot reduir.

S'ha demostrat la utilitat de l'anàlisi quantitativa de riscos aplicat a una canonada d'aquestes característiques, com a metodologia per establir el mapa de risc sobre la zona d'afectació.

S'han pogut simular en ALOHA diversos escenaris accidentals (canonada de transport de GLP) afectant a un nucli urbà i s'han calculat les conseqüències sobre la seva població.

L'aplicació sistemàtica de l'anàlisi quantitativa de riscos és una eina essencial per a millorar la seguretat d'aquestes instal·lacions.

10. Anàlisi de l'impacte ambiental

L'impacte ambiental produït per la realitzar aquest projecte es basa en l'ús exclusiu d'Ordinador ja que es un treball teòric amb moltes simulacions i aprenentatge autònom del programa ALOHA ; l'impacte i consum elèctric que genera es pot calcular com:

$$Consum\ elèctric(kW) = Temps\ d'ús(h) \cdot Consum\ d'ordinador(\frac{kW}{h})$$

Així doncs, el temps dedicat a la recerca bibliogràfica, auto aprenentatge d'ALOHA i realització de la memòria ha estat de unes 600 hores aproximadament i el consum d'un ordinador es aproximat de 0,365(kW/h):

$$Consum\ elèctric(kW) = 660(h) \cdot \frac{0.365kW}{h} = \mathbf{219kW}$$

11. Anàlisi Econòmica

En aquest apartat es calcularan els costos econòmics per a la realització del projecte; al ser un treball totalment teòric tots els costos tindran a veure amb consum elèctric de l'ordinador, llicències de software, llibres i recurs humà.

Objecte	Preu unitari[€]	Temps d'amortització [anys]	Equació	Cost real[€]
Ordinador	1500	10	$Cost = \frac{Preu\ unitari}{tempsd'amortització} \cdot \acute{u}s$	75
CC Adobe Photoshop	1400€	4	$Cost = \frac{Preu\ unitari}{tempsd'amortització} \cdot \acute{u}s$	175
Microsoft Office	259,99	6	$Cost = \frac{Preu\ unitari}{tempsd'amortització} \cdot \acute{u}s$	21,67
AutoCad	2999,99	2	$Cost = \frac{Preu\ unitari}{tempsd'amortització} \cdot \acute{u}s$	750
Despesa de copisteria	150	-	-	150
Factor humà	600h	-	$Cost = hores \cdot preu\ per\ hora(\frac{8€}{h})$	4800
Total	-	-	-	5971

Bibliografia

[1]. Al Jazeera and wire services(January 2014).Obtingut de http://america.aljazeera.com/articles/2014/1/25/transcanada-naturalgaspipelineexpodesnearwinnipeg.html

[2]. The World Factbook — Central Intelligence Agency. (n.d.). Obtenido de(Junio 2, 20179 https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/fields/2117.html

[3]. .Casal, J (1999)."analisis del riesgo en instalaciones industriales. Consultat el 5 de març. Obtingut de https://books.google.es/books?id=U8PRs-nLWqQC&pg=PA84&lpg=PA84&dq=llamarada+flashfire&source=bl&ots=juD6_YGlfA&sig=0v8wogSrj4z_m0ueMAtxSeJB11Q&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwi7ocys_MbaAhUGsBQKHRWBB_EQ6AEIajAM#v=onepage&q=llamarada%20flashfire&f=false

[4]. Mahgerefteh, H., & Atti, O. (n.d.). (54f) An Analysis of the Gas Pipeline Explosion at Ghislenghien, Belgium | AIChE Academy. Obtenido de (Junio 2, 2017) from https://web.archive.org/web/20110724154332/http://www.iab-atex.nl/publicaties/database/Ghislenghien%20Dossier.pdf

[5]. D.Vilafañe, J.Casal, & J. Vilchez. (2015). Flash fire main features and mathematical modelling. IChEAP, 2015

[6]. Casal, J. Evaluation of the effects and Major Consequences of Major Accidents in Industrial Plants. Else vier. Amsterda, 2017.

[7]. Fernández De Castro Díaz, Á. (n.d.). Notas Técnicas de Prevención Evaluación de las condiciones de evacuación en centros de trabajo. Obtenido de http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/821a921/884w.pdf

[8]. Bubbico, R., Carbone, F., Ramírez-Camacho, J., Pastor, E., & Casal, J. (2016). Conditional probabilities of post-release events for hazardous materials pipelines. *Process Safety and Environmental Protection*, *1*(6), 95–110. https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.08.https://www.ntsb.gov/investigations/AccidentReports/Reports/PAR0301.pdf

[9]. Sierra, E. T. (n.d.). NTP 326: Radiación térmica en incendios de líquidos y gases Radiation thermique en incendies de liquides et gaz Heat radiation in fires of liquids and gases. Retrieved from http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_326.pdf

[10]. Ministerio de Fomento, Consultado de http://habitat.aq.upm.es/bbvv/fichas/2006/fe-barrios/fe06_08015006.pdf

.

Annex A Fitxa de seguretat del propà (INSHT)

Fichas Internacionales de Seguridad Química

PROPANO (licuado) (botella a presión)		**ICSC: 0319** Noviembre 2003
n-Propano		
CAS:	**74-98-6**	**C_3H_8 / $CH_3CH_2CH_3$**
RTECS:	**TX2275000**	**Masa molecular: 44,1**
NU:	**1978**	
CE Índice Anexo I:	**601-003-00-5**	
CE / EINECS:	**200-827-9**	

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 manuales no generadoras de chispas.	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 **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.

IPCS International Programme on Chemical Safety

Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © CE, IPCS, 2005

VÉASE INFORMACIÓN IMPORTANTE AL DORSO

Fichas Internacionales de Seguridad Química

PROPANO **ICSC: 0319**
(licuado) (botella a presión)

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/m³; 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.

EFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN:
La evaporación rápida del líquido puede producir congelación. La sustancia puede afectar al sistema nervioso central.

EFECTOS 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

Nota legal Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. Su posible uso no es responsabilidad de la CE, el IPCS, sus representantes o el INSHT, autor de la versión española.

© IPCS, CE 2005