

Resum

En aquest projecte s'analitza el risc associat a les infraestructures portuàries de gas natural líquid (GNL). Concretament, aquelles infraestructures que han aparegut en els últims anys i de les quals no s'han realitzat estudis detallats dels accidents greus que hi poden ocórrer, com són les *Floating Storage and Regasification Units* (FSRU).

El GNL s'ha estès com a combustible alternatiu per a grans vaixells mercants degut a la reducció d'emissions que suposa respecte els combustibles tradicionals. En aquest context, i degut a la implementació de la directiva 2014/94/EU, han augmentat les infraestructures portuàries existents i n'han aparegut de noves, com les FSRU.

En aquest treball es realitza una anàlisi històrica dels diferents incidents involucrant GNL. No només el nombre d'accidents és molt menor que els que es troba en altres tipus de vaixells, sinó que s'ha pogut observar que en ells hi ha un nombre molt baix de víctimes mortals. Pel que fa a les FSRU, degut a què només existeixen des de fa uns 10 anys, no hi han accidents importants registrats.

Per tal de d'analitzar i determinar el risc que presenten aquestes noves unitats FSRU s'ha dut a terme una anàlisi quantitativa i qualitativa de risc d'aquestes. S'ha descrit la metodologia ha utilitzar per tal de determinar els riscos i els perills d'aquestes unitats, així com les seves potencials conseqüències. També s'han determinat les freqüències de cada possible escenari que pot produir conseqüències mortals. La freqüència d'aquests esdeveniments es demostra inferior a 10^{-6} vegades/any, per lo que és una situació de risc teòricament acceptable per la societat.

Per a complementar l'anàlisi de risc, s'han utilitzat tres mètodes per tal de determinar la sobrepressió a diferents distàncies en cas d'un accident que comporti una fuga i la formació d'un núvol inflamable. Els models analitzats són: TNT equivalent, Multi-Energia i FLACS. Aquest últim és un software de simulació basat en eines CFD, una de les eines més sofisticades que actualment existeixen en la simulació d'explosions. Els resultats mostren una bona correlació entre el mètode Multi-Energia i el software FLACS, mentre que els resultats obtinguts amb el mètode del TNT equivalent sempre sobreestimen la sobrepressió produïda.

Finalment, es mostra el cronograma del projecte i l'avaluació econòmica, així com l'impacte ambiental del mateix, arribant a la conclusió que aquest és mínim.



Resumen

En el presente proyecto se analiza el riesgo asociado a las infraestructuras portuarias de gas natural licuado (GNL). Concretamente, aquellas infraestructuras que han aparecido en los últimos años y de las cuales no se han realizado aun grandes estudios de riesgo, como son las *Floating Storage and Regasification Units* (FSRU).

El GNL se ha extendido como combustible alternativo para grandes barcos mercantes debido a la reducción de emisiones que supone respecto los combustibles tradicionales. En este contexto, y debido a la implementación de la directiva 2014/94/EU, han aumentado las infraestructuras portuarias existentes y han aparecido de nuevas, como las FSRU.

Se ha realizado un análisis histórico de los diferentes incidentes involucrando GNL. No solamente el número de accidentes es mucho menor que el de otros tipos de barcos, sino que hay un número muy bajo de consecuencias mortales. En cuanto a las FSRU, debido a que sólo existen desde hace unos 10 años, no hay accidentes importantes registrados.

Para analizar y determinar el riesgo que representan estas nuevas unidades FSRU se ha llevado a cabo un análisis cuantitativo y cualitativo del riesgo de éstas. Se presenta la metodología a utilizar para determinar el riesgo y los peligros de estas unidades, así como sus potenciales consecuencias. También se determinan las frecuencias de cada posible escenario que pueda producir consecuencias mortales. La frecuencia de estos eventos se demuestra inferior a 10^{-6} veces/año, por lo que es una situación de riesgo teóricamente aceptable para la sociedad.

Para completar el análisis de riesgo, se han utilizado tres métodos para determinar la sobrepresión a diferentes distancias en caso de un accidente que comporte fuga y la formación de una nube inflamable. Los modelos analizados han sido: TNT equivalente, Multi-Energía y FLACS. Este último es un software de simulación basado en herramientas CFD, una de las herramientas más sofisticadas que actualmente existen en la simulación de explosiones. Los resultados muestran una buena correlación entre el método Multi-Energía i el software FLACS, mientras que los resultados obtenidos con el método del TNT equivalente siempre sobreestiman la sobrepresión producida.

Finalmente, se muestra el cronograma del proyecto y la evaluación económica, así como el impacto ambiental del mismo, llegando a la conclusión de que éste es mínimo.



Abstract

This project analyzes the risk of port infrastructures for liquefied natural gas (LNG). Specifically, those infrastructures that have appeared in recent years and which have not yet been analyzed through detailed risk studies, such as Floating Storage and Regasification Units (FSRU).

LNG has been extended as an alternative fuel for large merchant ships due to the reduction of emissions it assumes with respect to traditional fuels. In this context, and owing to the implementation of Directive 2014/94/EU, existing port infrastructures have grown and new ones have appeared, such as FSRU.

A historical analysis of the different incidents involving LNG has been carried out. Not only the number of accidents is much lower than other types of ships, but also there are a very low number of fatalities. As for the FSRU, because they only exist for about 10 years, there are no major accidents recorded.

In order to analyze and determine the risk associated to these new FSRU units, a quantitative and qualitative analysis of their risk has been developed. The methodology to be used to determine the risk and the hazards of these units is presented, as well as their potential consequences. The frequencies of each possible scenario that can produce fatal consequences have also been determined. The frequency of these events is shown to be less than 10^{-6} times/year, making it a theoretically acceptable risk situation for society.

To complete the risk analysis, three methods have been used to determine the overpressure at different distances in the event of an accident involving leakage. The models that have been analyzed are: equivalent TNT, Multi-Energy and FLACS. The latter is a simulation software based on CFD tools, one of the most sophisticated tools that currently exist in the simulation of explosions. The results show a good correlation between the Multi-Energy method and the FLACS software, while the results obtained with the equivalent TNT method always overestimate the overpressure produced.

Finally, the project schedule and the economic evaluation are shown, as well as the environmental impact of the project, concluding that this one is minimum.



Sumari

| | |
|--|-----------|
| RESUM | 1 |
| RESUMEN | 3 |
| ABSTRACT | 5 |
| SUMARI | 7 |
| 1. GLOSSARI | 9 |
| 2. PREFACI | 11 |
| 3. INTRODUCCIÓ | 13 |
| 3.1. Objectius del projecte | 13 |
| 3.2. Abast del projecte | 13 |
| 4. EL GAS NATURAL EN INSTAL·LACIONS MARÍTIMES I PORTUÀRIES | 15 |
| 4.1. Introducció al GNL | 15 |
| 4.1.1. Mètodes de propulsió tradicionals | 15 |
| 4.2. Infraestructures portuàries i marítimes | 17 |
| 4.2.1. Cadena de subministrament de GNL | 17 |
| 4.2.2. Unitats FSRU (<i>Floating Storage Regasification Units</i>) | 20 |
| 4.2.2.1. Amarratge tipus illa | 22 |
| 4.2.2.2. Amarratge directe a port | 23 |
| 5. ANÀLISI HISTÒRICA D'ACCIDENTS AMB GNL | 25 |
| 5.1. Perills associats al GNL | 25 |
| 5.2. Recull d'accidents | 26 |
| 6. ANÀLISI DE RISC EN INSTAL·LACIONS MARÍTIMES DE GNL | 31 |
| 6.1. Anàlisi qualitativa | 31 |
| 6.2. Anàlisi quantitativa | 34 |
| 7. SIMULACIÓ DE L'EXPLOSIÓ | 39 |
| 7.1. Disseny de la simulació | 41 |
| 7.2. Mètode del TNT equivalent | 43 |
| 7.3. Mètode Multi-Energia | 47 |

| | |
|--|-----------|
| 7.4. Anàlisi de resultats | 49 |
| 7.4.1. Comparativa de models en l'escenari prefixat | 49 |
| 7.4.2. Comparativa de models en un escenari portuari | 51 |
| 8. NORMATIVA _____ | 55 |
| 9. CRONOGRAMA _____ | 57 |
| 10. DIMENSIÓ ECONÒMICA _____ | 59 |
| 11. IMPACTE MEDIAMBIENTAL _____ | 63 |
| CONCLUSIONS _____ | 65 |
| AGRAÏMENTS _____ | 67 |
| BIBLIOGRAFIA _____ | 69 |

1. Glossari

ΔP : Diferencial de pressió o sobrepressió.

BLEVE: Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion (Explosió del Vapor en Expansió format d'un Líquid en Ebullició).

CAD: Computer Aided Design (Disseny Computacional Assistit).

CASD: Computer Aided Scenario Design (Disseny Computacional Assistit d'Escenaris).

CFD: Computational Fluid Dynamics (Dinàmica Computacional de Fluids).

CO₂: Diòxid de Carboni.

FLACS: Software d'anàlisi CFD.

FSRU: Floating Storage Regasification Unit (Unitats Flotants d'Emmagatzematge i Regasificació).

GHG: Green House Gases (Gasos d'Efecte Hivernacle).

GN: Gas Natural.

GNL: Gas Natural Lìquid.

HFO: Heavy Fuel Oil (Fuel-Oil Pesat).

LNG FSRU: Unitat FSRU de GNL.

LNGC: Liquefied Natural Gas Carrier (Vaixell de Càrrega de GNL).

MDO: Marine Diesel Oil (Dièsel Marítim).

MGO: Marine Gas Oil (Gas-Oil Marítim).

NO_x: Òxids de Nitrogen.

ONG: Organització No Governamental.

PM: Particulate Mater (Material Particulat).

PTS: Pipeline Terminal to Ship (Canonada a Vaixell).

RD: Real Decreto.

SO_x: Òxids de Sofre.

STS: Ship to Ship (Vaixell a Vaixell).

TEN-T: Trans-European Transport Network (Xarxa de Transport Trans-Europea).

TTS: Truck to Ship (Camió a Vaixell).

UE: Unió Europea.

UNE: Una Norma Española.

2. Prefaci

Motivat a partir de la implementació de la directiva 2014/94/EU, han augmentat les infraestructures portuàries dedicades al gas natural líquid (GNL). Aquest augment, no obstant això, no ha anat acompanyat d'un creixement suficientment ràpid de l'estudi dels riscos associats a aquest tipus d'instal·lacions.

És en aquest context, que apareixen les *Floating Storage and Regasification Units* (FSRU), per tal de donar resposta a aquesta necessitat de més i millor estructures, així com d'una major flexibilitat. Aquestes unitats combinen un vaixell de càrrega de GNL tradicional amb instal·lacions pròpies d'una planta *off-shore* portuària. Tenint en compte tot l'expressat anteriorment, es fa imperiós l'anàlisi de risc d'aquest tipus d'instal·lacions marítimes.

Aquest projecte és part d'un projecte col·laboratiu entre la Universidad Nacional del Sur (Bahía Blanca, Argentina) i la EEBE-UPC (Espanya). Mitjançant diversos projectes d'aquest caire s'ha d'aconseguir una visió global del risc associat a les noves infraestructures portuàries que sorgeixen degut a les normatives recents que busquen potenciar aquest tipus de combustible.



3. Introducció

3.1. Objectius del projecte

L'objectiu principal del present projecte és l'estudi del risc associat a les infraestructures portuàries que utilitzen gas natural líquid (GNL). Aquest risc està focalitzat sobretot en les operacions de càrrega i descàrrega, on la probabilitat de produir-se una fuga és molt més elevada que en la resta de situacions. Una fuga de gas natural en determinades condicions atmosfèriques pot donar lloc a una explosió amb efectes y conseqüències greus sobre persones i instal·lacions.

Com a objectiu secundari, s'analitzarà la viabilitat del software de simulació FLACS per estudiar escenaris d'explosions a partir d'una fuga de GNL en una instal·lació portuària. Per realitzar-ho, s'utilitzarà el FLACS amb un escenari dissenyat per a reproduir el màxim possible una situació de treball real.

3.2. Abast del projecte

L'abast d'aquest projecte cobreix tres grans blocs principals. Un primer bloc en el qual s'analitzen els riscos i perills associats a les operacions portuàries amb GNL, tant de manera quantitativa com qualitativa. Per fer-ho s'utilitzaran arbres de fallades i esdeveniments.

En el segon bloc, es realitza una anàlisi històrica dels accidents ocorreguts involucrant GNL en diferents instal·lacions portuàries o en vaixells a alta mar. Això ha permès donar una visió general de la quantitat i tipologia d'accidents que s'han produït al llarg de l'existència d'aquesta tecnologia, així com observar quines són les causes més habituals.

Finalment, el tercer bloc està dedicat completament a l'anàlisi dels efectes i conseqüències de les explosions que poden ocórrer. Aquesta anàlisi s'ha dut a terme mitjançant l'aplicació de dos mètodes clàssics, el de la massa equivalent de TNT i el multi-energia. Addicionalment, s'ha treballat en la simulació amb el programa FLACS d'un escenari el més aproximat possible a la realitat.

4. El Gas Natural en instal·lacions marítimes i portuàries

4.1. Introducció al GNL

L'ús del GNL (Gas Natural Liquef) és creixent com a combustible alternatiu per grans vaixells de transport. Les seves bones propietats energètiques i poc contaminants el fan un candidat excel·lent per a substituir els mètodes de propulsió actuals.

El GNL és la forma líquida del GN (Gas Natural). Aquest gas és una mescla d'hidrocarburs gasosos i d'altres components que s'obtenen de bosses subterrànies. Hidrocarburs com el butà o el propà, així com d'altres impureses, s'eliminen durant el processament del GN abans de ser utilitzat. Com a resultat, la composició del GN i, en conseqüència, del GNL, és bàsicament metà.

La conversió del GN a GNL és de gran utilitat, ja que en estat gasós, la seva densitat energètica és realment baixa. Aproximadament, un m³ de GN té la mateixa densitat energètica que 1 litre de dièsel (gasoil). Aquest fet impossibilita l'ús del GN com a combustible per a grans vaixells, així com el seu transport de manera eficient. Per tant, s'opta per refredar el GN fins a temperatures per sota del seu punt d'ebullició (-162 °C). En la seva forma líquida, té una densitat menor a la de l'aigua (0,43 g/l), és inodor, incolor, no corrosiu i no tòxic. [Envocare, 2013]

4.1.1. Mètodes de propulsió tradicionals

Tradicionalment el transport marítim ha utilitzat tres tipus de combustibles majoritaris, fuel-oil pesat, o HFO per les seves sigles en anglès (Heavy Fuel Oil), el dièsel marítim, o MDO (Marine Diesel Oil), i el gas-oil marítim, o MGO (Marine Gas Oil). [CNGVA, 2014]

- HFO: Ha estat el més habitual tradicionalment. Es considera un producte residual, ja que s'obté quan els components més valuosos del cru ja han estat separats. Degut a això, conté una quantitat de contaminants elevada, com per exemple cendres, sulfur i sodi, fet que causa una gran contaminació mediambiental en el procés de combustió.
- MDO: Conté una concentració de sulfurs menor a la del HFO. Tot i així, fins fa poc la concentració màxima permesa encara era força alta, d'un 1%. A partir del 2015

aquesta concentració llindar s'ha reduït, amb un límit del 0,1% en pes. [CNGVA, 2014]

- MGO: Similar al MDO, tradicionalment ha tingut continguts de sofre del 1,5%. No obstant això, de manera similar que el MDO, la nova legislació l'obliga a complir amb un límit del 0,0015%. [CNGVA, 2014]

Pel que fa al GNL, el seu ús s'està estenent a escala global, però amb un percentatge molt menor que el dels combustibles tradicionals. Un dels grans motius per l'ús d'aquest combustible és la menor contaminació ambiental durant el procés de combustió respecte als combustibles tradicionals. A continuació es presenten els contaminants més habituals generats pels actuals motors utilitzats en el sector marítim, així com el benefici que suposa la utilització del GNL:

- GHGs: Els gasos d'efecte hivernacle, o Green House Gases (GHGs) majoritaris són bàsicament el CO_2 i el CH_4 . El CO_2 alliberat és essencialment degut al contingut en carboni present en els actuals combustibles utilitzats. El GNL aconsegueix reduir les emissions d'aquest gas entorn d'un 25-30%. Pel que fa al CH_4 , pot ser emès a l'exterior a causa de petites fuites dels motors de GNL. Per la gran capacitat del CH_4 com a gas d'efecte hivernacle, és prioritari minimitzar al màxim aquest tipus de pèrdues.
- SO_x : El GNL pràcticament no presenta contingut en òxids de sofre, mentre que, tal com s'ha comentat anteriorment, els combustibles utilitzats tradicionalment en contenen una quantitat important.
- NO_x : L'alliberament de NO_x depèn bàsicament de la temperatura de combustió del motor. En el cas dels motors dièsel, aquesta temperatura sempre serà més elevada que en un motor que utilitzi GNL. Per tant, el contingut d'aquest component alliberat sempre serà menor en un motor de GNL.
- PM: Les partícules alliberades, o PM (*Particulate Mater*), són el resultat de la combustió incompleta o deficient dels combustibles. Aquestes inclouen partícules de carboni, sulfats i nitrats en forma aerosol. Mentre que el GNL presenta valors al voltant del 0,04% de PM (g/kWh), la resta de combustibles tenen uns valors que van des del 0,25% fins al 1,88%, valors tots ells molt més elevats.

Per tant, s'observa que un vaixell propulsat amb GNL, pot arribar a reduir les emissions de CO_2 fins a un 29%, els GHGs en un 19% de CO_2 equivalent (ja que es tenen en compte les fuites de CH_4), els SO_x un 85%, els NO_x entre un 35% i un 85% (depenent si és un cicle Diesel o Otto) i les PM fins a un 85%.

Tenint en compte aquests conceptes, es pot fer un càlcul aproximat de les reduccions en emissions que suposaria aquest canvi. A la taula 4.1, es mostra l'estalvi d'emissions esperat a la zona oest de Canadà en els pròxims anys: [CNGVA, 2014]

Taula 4.1: Estalvi d'emissions per l'ús de GNL, en tn/any. [CNGVA, 2014]

| Estalvi d'emissions (tn/any) | | |
|------------------------------|---------|-----------|
| | 2020 | 2025 |
| CO ₂ | 720.000 | 1.730.000 |
| NO _x | 21.900 | 51.800 |
| SO _x | 31.100 | 76.500 |
| PM | 4.570 | 11.200 |

Tot i que en valor absolut poden semblar valors molt elevats, cal tenir en compte que són només una petita part de les emissions totals d'aquest tipus de vaixells marítims. No obstant això, aquestes xifres demostren el potencial d'aquest tipus de combustible com a opció més respectuosa pel medi ambient.

4.2. Infraestructures portuàries i marítimes

Per aconseguir que el GNL sigui un combustible pel transport marítim viable i àmpliament utilitzat, és important comptar amb una estructura de subministrament adequada. A més a més, és necessari que aquestes estructures estiguin presents en el nombre més gran de ports i països possibles. Per aquest motiu, la Unió Europea (UE) va implementar la directiva 2014/94/EU, per tal de garantir en el futur més proper una infraestructura suficientment àmplia que permeti el moviment de vaixells amb aquest tipus de combustible dins de l'anomenada zona TEN-T (de l'anglès *Trans-European Transport Networks*).

4.2.1. Cadena de subministrament de GNL

La cadena de subministrament del GNL comprèn des del punt inicial de la producció del GN, el seu posterior tractament / condicionament, la seva conversió de GNL i el seu transport fins

a les instal·lacions d'emmagatzematge i el seu destí final.

A la figura 4.1, es pot observar un esquema que il·lustra aquesta cadena de subministrament des del seu punt inicial fins a l'usuari final. El requadre vermell indica la zona portuària.

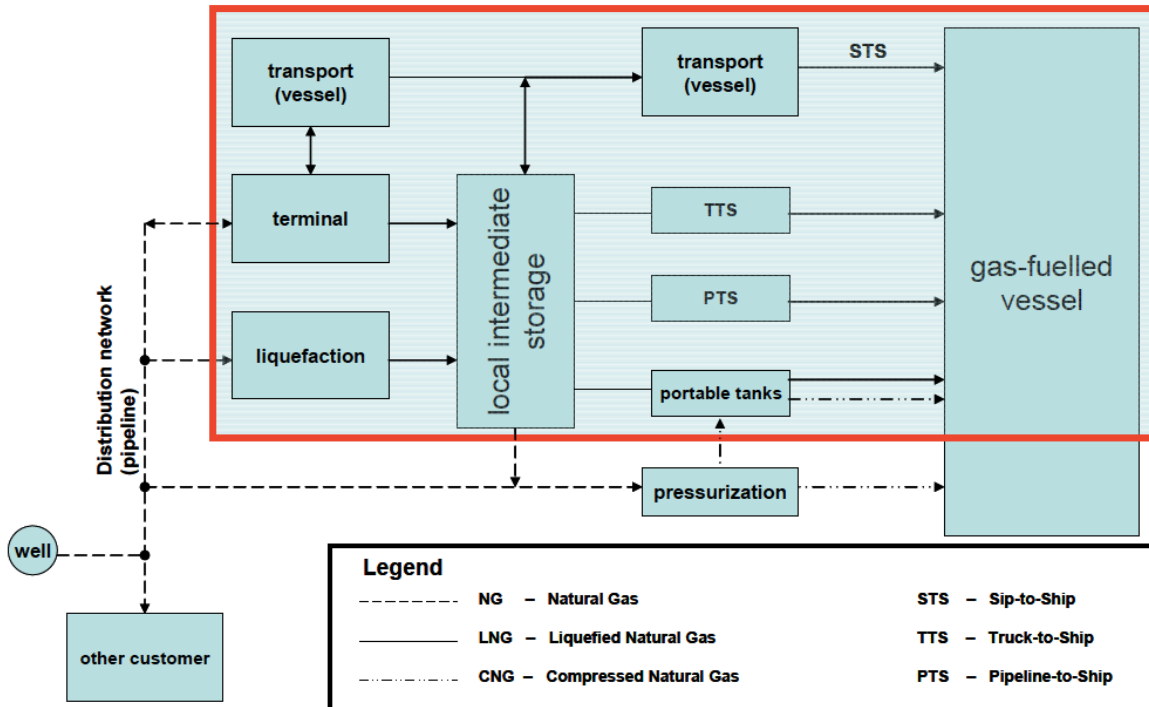


Figura 4.1: Cadena de subministrament genèrica de GNL. [EMSA, 2013]

Seguint el flux d'esquerra a dreta, primerament s'extreu el GN d'un jaciment subterrani, seguit d'una purificació per tal d'eliminar partícules sòlides, propà, butà i d'altres compostos. A continuació, aquest gas pot enviar-se de manera directa a una terminal portuària en forma gasosa, en forma líquida o pressuritzat. Evidentment, també es pot enviar directament a d'altres consumidors, externs a cap instal·lació portuària, però no es tindran en compte en la realització d'aquest treball.

En cas d'arribar de manera gasosa a la terminal, aquest es liqua i s'emmagatzema en tancs a la pròpia terminal, o es pot liquar i emmagatzemar en una unitat FSRU (*Floating Storage Regasification Unit*). Aquestes unitats són vaixells especialment dissenyats no només per emmagatzemar i transportar GNL, sinó que també incorporen les instal·lacions necessàries per re-gasificar el gas al mateix vaixell. Es parlarà d'aquestes unitats extensament més endavant.

Un cop el GN ja s'ha liquat i està a les instal·lacions portuàries, hi ha bàsicament quatre

maneres de subministrar el GNL al vaixell final: [ABS, 2014]

- Tanc d'emmagatzematge - Vaixell (PTS). A través de canonades es connecta un tanc d'emmagatzematge, present a la mateixa terminal, amb el vaixell. Les canonades solen estar dissenyades per poder subministrar combustible des de més d'un tanc alhora.
- Camió - Vaixell (TTS). Un camió cisterna subministra el combustible a través de mànegues directament al vaixell. Aquesta operació sol ser duta a terme en un moll especialment dissenyat per aquest fet.
- Vaixell - Vaixell (STS). En aquesta situació, vaixells especialment preparats i carregats amb GNL, com les anteriorment esmentades unitats FSRU, es col·loquen al costat del vaixell de càrrega quan aquest està ancorat al moll. D'aquesta manera, es permet que el vaixell de càrrega descarregui la seva mercaderia alhora que se li subministra combustible. Aquest ha estat tradicionalment el mètode de subministrament més habitual.
- Tancs d'emmagatzematge portàtils. En lloc de carregar el vaixell mitjançant canonades o mànegues externes a aquest, el que es fa és carregar el vaixell en qüestió amb tancs plens de GNL. Posteriorment, el vaixell els connectarà amb els seus dipòsits de GNL. D'aquesta manera s'aconsegueix evitar algunes normatives sobre el subministrament de GNL, ja que es considera simplement com la càrrega d'un material perillós a un vaixell, no com una aportació de combustible.

A la imatge inferior 4.2 es pot veure una il·lustració de cadascuna de les diferents maneres de subministrar GNL:

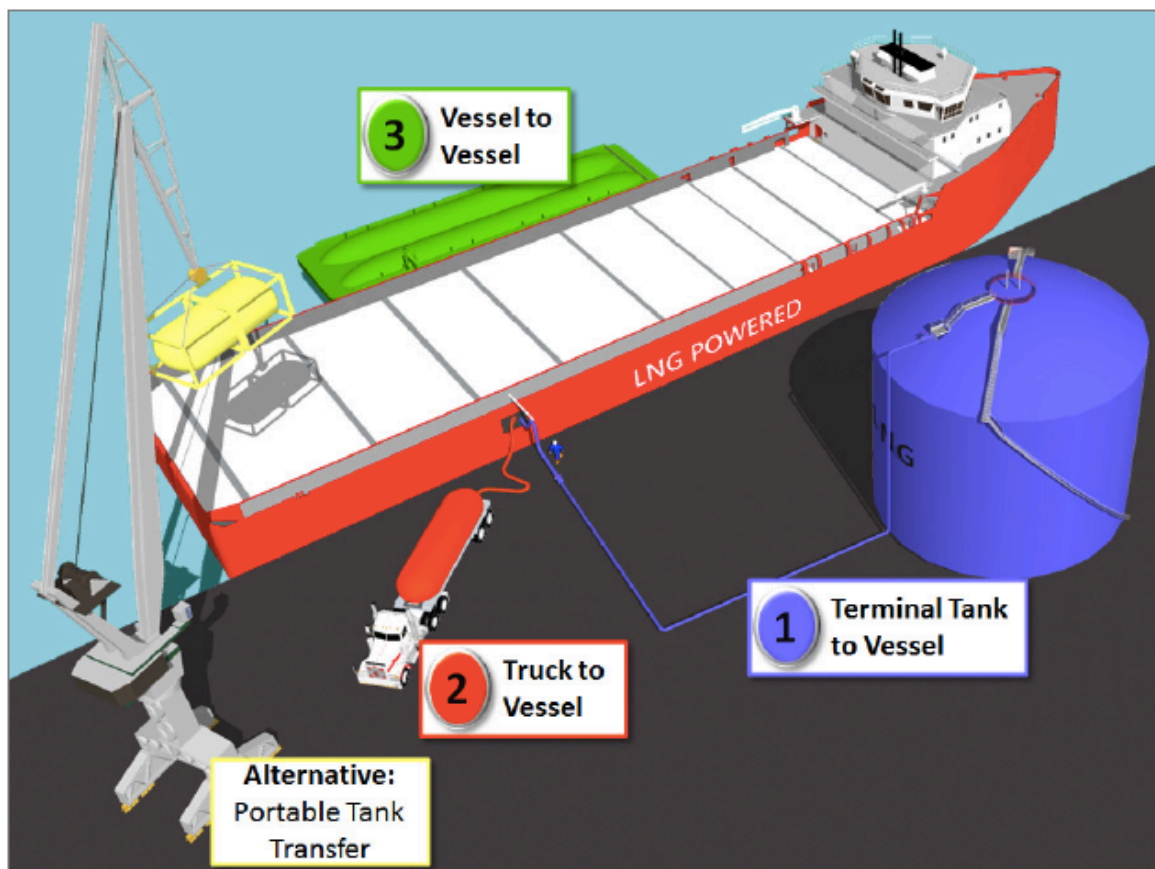


Figura 4.2: Diferents formes de subministrament del GNL. [ABS, 2014]

4.2.2. Unitats FSRU (*Floating Storage Regasification Units*)

Tradicionalment, les infraestructures re-gasificadores només eren possibles en terminals terrestres (*on-shore*). Actualment, degut a la necessitat d'augmentar i millorar les instal·lacions de reg-asificació, motivada per la directiva 2014/94/EU esmentada anteriorment, han fet proliferar les unitats FSRU. Aquestes unitats han permès a nacions emergents una via més barata i ràpida d'atacar l'escassetat d'energia mitjançant la importació de GNL, degut a la integració de la regasificació i transport del mateix en una sola instal·lació. A més a més, el seu cost és d'aproximadament 300 milions de dòlars, representant la meitat que una terminal de regasificació terrestre. [GNL global, 2015]

Apart dels avantatges econòmics que pugui presentar, el fet de convertir un vaixell de càrrega de gas natural líquid (LNGC) en una FSRU de gas natural líquid (LNG FSRU), representa una major velocitat d'implementació, menys infraestructura terrestre, amb la seva consegüent reducció de riscos pel personal, així com una major flexibilitat pel que fa a la

localització física del terminal de regasificació. Aquest últim fet és especialment útil quan la demanda es redueix dràsticament, o aquesta té un comportament molt estacional i, per tant permet reubicar el terminal de regasificació en una localització més profitosa.

Cal tenir present quines són les diferents seccions d'aquesta estructura, ja que això ens permetrà determinar els punts més vulnerables a patir fuites o accidents. El diagrama de blocs d'una terminal FSRU, de manera simplificada, seria el presentat a la figura 4.3:

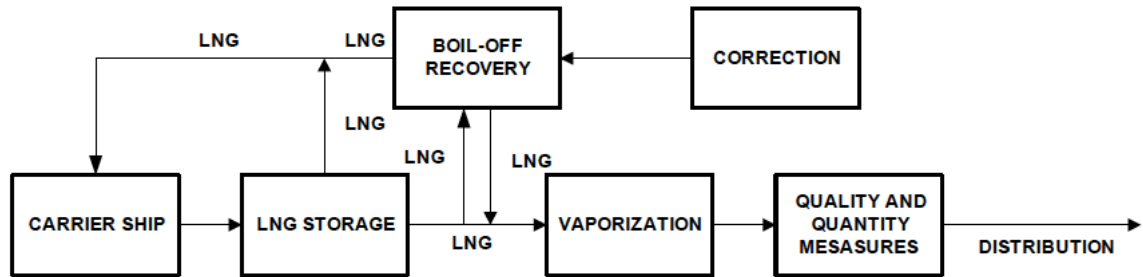


Figura 4.3: Diagrama de blocs d'una terminal FSRU. [Vianello, 2014]

A través d'un LNGC, o de manera directe des del port, arriba el GNL a la terminal FSRU. Aquest GNL s'emmagatzema en tancs, normalment en 3-4 tancs esfèrics amb una capacitat total que oscil·la entre els 120.000 i els 160.000 m³. El GNL a l'interior dels tancs es sol mantenir a una pressió relativa d'entre 0,07 i 0,25 bars, i a una temperatura de -163 °C. Cada tanc compta amb diverses vàlvules de seguretat per tal de prevenir qualsevol efecte derivat d'un excés de pressió o depressió a l'interior dels tancs. Aquestes vàlvules estan connectades al sistema de ventilació per evitar que en cas d'una situació així el GN es dispersi per les instal·lacions.

Des dels tancs de GNL, aquest pot anar en tres direccions: cap als recuperadors de gas residual, o *boil-off*, cap als vaporitzadors per obtenir GN, o fins i tot pot tornar cap el LNGC per tal de descarregar el GNL. Per tal de moure el gas, els tancs incorporen bombes que permeten connectar aquests amb la resta de seccions del FSRU. Així mateix, aquestes instal·lacions inclouen compressors, escalfadors i refrigeradors.

Finalment, i previ a la descàrrega del GN per la seva distribució, hi ha un control de diversos paràmetres per tal d'assegurar que el GN estigui a la pressió i temperatura adequada. Així mateix, també és de vital importància assegurar que no hi ha presència de líquid en el GN final.

Les instal·lacions FSRU també incorporen un sistema d'ancoratge, així com mànegues de càrrega i descàrrega.

Bàsicament hi ha dues configuracions principals de connexió d'aquest tipus d'unitats amb el port, les que utilitzen un amarratge de tipus illa, ancorat a una petita plataforma mar endins, i els que utilitzen un amarratge directe al port, amb connexió directa a terra ferma. Aquestes dues configuracions es presenten a continuació.

4.2.2.1. Amarratge tipus illa

Aquest tipus d'amarratges són de relativament simple construcció, tot i que representen una dificultat afegida per l'accés dels vaixells. No obstant això, en estar més allunyats de la costa presenten menor risc cap al personal de terra. A més a més, necessiten canonades subaquàtiques que connectin l'illa amb el port, fent-la sensible a temporals marítims i d'altres inclemències del temps.

Segons la col·locació dels dos vaixells, tant del LNG FSRU com del LNGC, es poden tenir dues configuracions: cada vaixell en un cantó de l'amarratge o tots dos en un sol cantó. La figura 4.4 que es mostra a continuació mostra totes dues configuracions.

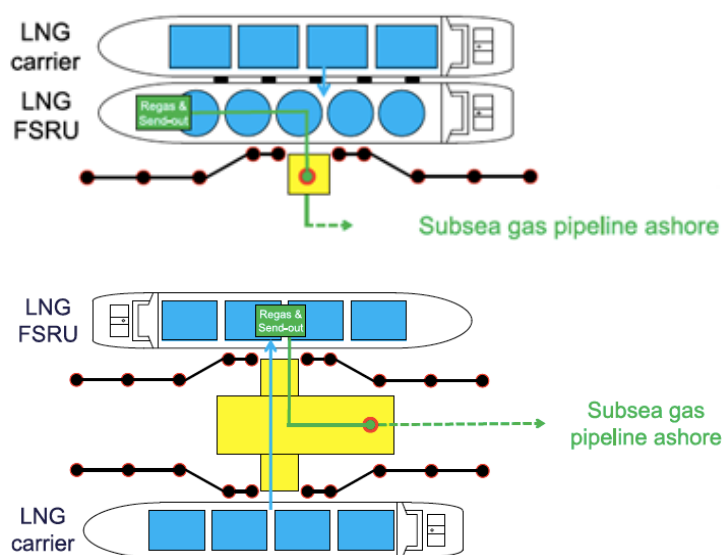


Figura 4.4: Amarratge tipus illa. a) LNGC i LNG FSRU en connexió directa. b) LNGC i LNG FSRU connectats per una passarel·la. [Harsema-Mensonides, 2013]

En la figura 4.4 a), el LNGC transfereix el GNL de manera directa al FSRU i posteriorment el FSRU re-gasifica el GNL a GN i aquest s'envia a través d'una canonada subaquàtica fins a terra ferma. En el cas de la figura 4.4 b), la transferència del GNL entre LNGC i FSRU es fa amb una canonada a través d'una passarel·la que connecta tots dos vaixells. A continuació la unitat FSRU envia a el GN a través d'una canonada, la qual té un primer tram que

comparteix espai físic amb la canonada de transferència de GNL, i un segon tram subaquàtic que connecta amb el port.

4.2.2.2. Amarratge directe a port

Igual que succeïa amb els d'amarratge de tipus illa, la construcció d'aquest tipus també és relativament senzilla. Permet un accés dels vaixells més senzill que l'anterior, però amb el risc més gran associat d'estar a una distància relativament petita del personal de terra del port, així com d'altres seccions d'aquest alienes a la càrrega i descàrrega del GN.

De la mateixa manera que en el cas anterior, es presenten dues alternatives pel que fa a la localització dels vaixells respecte de l'amarratge. Es poden observar totes dues a la figura 4.5 que es mostra a continuació.

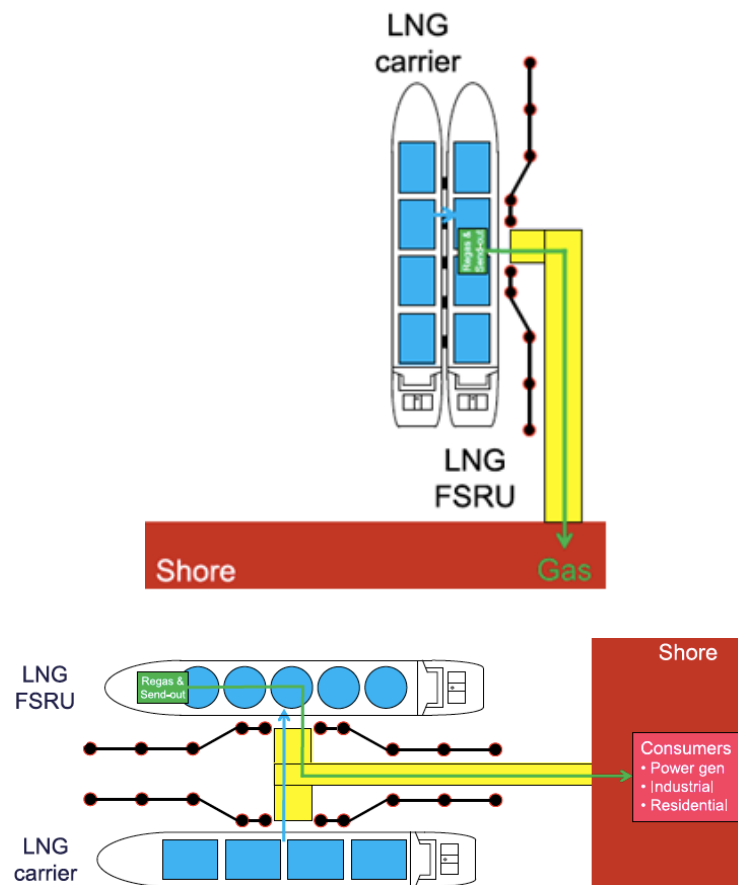


Figura 4.5: Amarratge directe a port. a) LNGC i LNG FSRU en connexió directa. b) LNGC i LNG FSRU connectats per una passarel·la. [Harsema-Mensonides, 2013]

Al igual que succeïa en la figura 4.4, a la figura 4.5 la diferència bàsica entre a) i b) és la manera en que es transfereix el GNL del LNGC a la unitat FSRU. A totes dues alternatives el GN està connectat amb el port a través d'una canonada convencional.

Després d'observar totes dues configuracions en cada estil d'amarratge, queda evidenciat que cal escollir entre dues disposicions dels vaixells, independentment del seu tipus d'amarratge. La primera, amb els vaixells un al costat de l'altre, permet que la canonada que va des dels FSRU fins a terra ferma, sigui de manera directa o a través d'un moll, sigui l'única present. S'elimina la possibilitat que la canonada de GNL i de GN comparteixin espai físic, reduint així la possibilitat d'un accident més gran en cas que hi hagués una fuga d'alguna de les dues canonades, per l'efecte dominó.

Pel que fa al tipus d'amarratge, tots dos tenen els seus punts positius i negatius. Això no obstant, tenint en compte que el que prima és sempre la màxima seguretat, més encara quan s'està treballant amb gasos criogènics i potencialment explosius, la millor configuració seria l'amarratge tipus illa. Aquest tipus d'amarratge permet realitzar el procés de connexió del LNGC amb el LNG FSRU, i el d'aquest amb la canonada que anirà finalment a terra ferma, el més allunyat possible d'altres persones.

Com ja s'ha comentat, l'operació que implica un major risc sempre és durant la càrrega i descàrrega del combustible¹. Si es manté el màxim d'operacions d'aquest estil allunyades de les persones alienes a aquesta tasca, s'aconsegueix minimitzar el risc de ferits i/o morts en cas d'accident.

D'altra banda, la implementació d'una canonada subaquàtica que connecti una plataforma de tipus illa amb el port, que pot ser d'uns quants kilòmetres, té un cost associat més gran que no pas una connexió directa a port. A més a més, els costos de manteniment i els reforços que haurà d'incorporar dita canonada seran sempre més elevats, a causa de la major pressió que aquesta ha de suporta i de la dificultat de fet cap mena de reparació.

5. Anàlisi històrica d'accidents amb GNL

5.1. Perills associats al GNL

Ja que el GNL és un gas criogènic, emmagatzemat a temperatures extremadament baixes, presenta uns perills i riscos únics en comparació als combustibles tradicionals.

Els principals perills associats al GNL són: [ABS, 2014]

- Greus ferides a la pell de les persones, pel contacte amb un líquid criogènic. El tipus de ferides són similars a aquelles produïdes per cremades tèrmiques. La inhalació prolongada d'aire extremadament fred pot provocar danys al teixit pulmonar.
- Debilitació d'estructures d'acer (fragilització), a causa de les baixes temperatures del GNL. Pot provocar el trencament de les estructures circumdants o afectant altres equipaments propers.
- Formació d'un núvol inflamable. Si es produeix una fuga de GNL, aquest passarà a gas de manera instantània pràcticament, formant un núvol que pot acabar inflamant-se i/o explotant. En aquest cas, perquè succeeixi algun d'aquests fets cal que el GN alliberat estigui en el rang d'inflamabilitat, que en aire és d'entre el 5,3% i el 14% en volum.
- Asfíxia del personal proper. Si la concentració de metà a l'aire és massa alta, hi ha un perill potencial d'asfíxia, especialment si la fuga es dona en un espai confinat i sense ventilació.

Els perills esmentats anteriorment poden donar-se a través de diferents esdeveniments inicials. A continuació es comenten els diferents esdeveniments i les principals causes que poden fer que succeeixin: [ABS, 2014]

- Fuites de bombes, canonades, mànegues o tancs de GNL. Poden ser degudes a la corrosió, fatiga, manteniment inadequat, mal segellament de les juntes, utilitzar mànegues no homologades per GNL o vibracions. A més a més, si no es fa un pre-refredament dels equipaments, també pot dur a la fragilització de l'equipament.
- Desconnexió o trencament de les mànegues. Es pot produir per culpa d'una connexió inadequada, moviment excessiu durant el període de càrrega o moviment del vaixell amb la mànega encara connectada. Les causes naturals, com el mal

temps o els desastres naturals també poden produir una desconexió sobtada.

- Sobrepressió i/o sobre ompliment dels tancs. Es pot produir quan tant l'operari que controla l'operació, com el control de nivell del tanc fallen a l'advertir que aquest està totalment ple.
- Impacte extern. Pot ser que el carregament d'un vaixell caigui sobre alguna part de l'equip de GNL, o que un altre vaixell o vehicle col·lisió contra el vaixell receptor o contra l'equip de GNL.

5.2. Recull d'accidents

Des del 1959 els bucs metaners han transportat més de 33.000 carregaments de GNL sense cap accident greu, tant a alta mar com en port. En els casos on hi ha hagut accidents involucrant aquests tipus de vaixells, mai hi ha hagut una pèrdua de contenció del GNL que pogués ocasionar un incendi o explosió. Per evidenciar-ho, es repassaran alguns dels accidents que han succeït involucrant aquests tipus de vaixells, així com els succeïts en instal·lacions *off-shore*, camions de transport, etc.

A continuació es mostren alguns accidents o incidents tipus que han tingut lloc a alta mar: [Woodward, 2010]

- 12 de desembre del 1980. El vaixell *LNG Taurus*, de 125.000 m³, va encallar durant un temporal marítim a Tobata, Japó. La part inferior del vaixell va resultar danyada, però va poder ser reflatat. Posteriorment, i de manera autònoma, va arribar a la terminal de Kita Kyushu, on va descarregar el GNL. No va haver-hi cap fuga de GNL.
- 1985. El vaixell *RamdaneAbane*, de 126.000 m³, va patir una col·lisió mentre estava carregant. Tot i que la proa del vaixell es va veure afectada, no hi va haver-hi alliberament de GNL.
- 21 de maig del 1997. El vaixell *Northwest Swift*, de 125.000 m³, va col·lidir contra un vaixell pesquer a 400 km de la costa del Japó. Tot i que el cas del vaixell es va veure malmès, no va haver-hi fuga de GNL.

Es pot comprovar que tot i poder haver-hi danys materials, tant del vaixell metaner com a altres elements involucrats, en cap cas s'ha produït una fuga de GNL.

Els següents accidents tenen relació amb incidents que han ocorregut mentre els vaixells

amb GNL eren dins del port: [Woodward, 2010]

- Febrer del 1989. El vaixell *Tellier*, de 40.000 m³, estava atracat a Skikda, Algèria, quan el fort vent el va desplaçar i es van trencar les mànegues de càrrega de GNL. Les canonades del vaixell van ser greument malmeses, mentre que la transferència de GNL es va aturar. Tot i així, part del GNL es va alliberar, sense provocar cap incident greu.
- 6 de setembre de 1999. El vaixell *Methane Polar*, de 71.500 m³, va patir una fallada al motor mentre s'aproximava al moll *Atlantic LNG* a Trinitat i Tobago. El moll va quedar danyat, però no va haver-hi ferits ni fuites de GNL.
- 2002. El vaixell *Norman Lady*, navegant en condicions de llast a l'est de l'estret de Gibraltar, va col·lisionar amb el submarí nuclear dels Estats Units *USS Oklahoma City*. El vaixell carregat amb GNL va patir una entrada d'aigua marina a l'àrea de doble fons per sota dels tancs, però sense arribar a afectar-los de manera directa.

Tot i que en algun d'aquests casos sí que han succeït fuites de GNL, cap d'elles va suposar una incidència greu. Com també la resta d'accidents, les úniques conseqüències van ser danys materials, fos al vaixell amb GNL, fos a les instal·lacions portuàries.

Apart dels incidents que tenen relació directa amb vaixells amb GNL, també és important tenir en compte anteriors accidents succeïts a instal·lacions *on-shore* de GNL. Alguns dels més representatius es mostren a continuació: [Woodward, 2010]

- 1989. En una instal·lació de *peak shaving*, (instal·lació que s'utilitza per neutralitzar demandes pic mitjançant l'emmagatzematge de GNL), a Thurley, Regne Unit. Mentre es refredaven els vaporitzadors abans d'enviar el gas natural, una de les vàlvules no es va tancar quan es va començar a bombejar GNL. Com a resultat, es va alliberar el GNL en forma de doll a alta pressió. El núvol de vapor es va encendre 30 segons després d'iniciar-se la fuga. El *flash fire* resultant, va cremar la cara i les mans de dos operaris.
- 19 de gener de 2004. L'accident va succeir a la planta de líquüefacció Sonatrach de GNL, a Skikda, Algèria. Va haver-hi una fuga en una línia de refrigeració, provocant que els vapors d'aquesta línia es barrejessin amb l'aire de combustió d'una caldera de vapor d'alta pressió. La caldera va explotar, danyant altres línies circumdants, provocant una explosió encara major, provocant grans danys a les instal·lacions. 27 treballadors van morir i 80 persones van resultar ferides.

Com s'ha vist, els accidents que han ocorregut en instal·lacions auxiliars de GNL han sigut,

en general, més greus que els que han tingut lloc en els propis vaixells, sigui a alta mar o a port.

Finalment, una altra circumstància que s'ha de tenir en compte és la possibilitat d'un accident involucrant un camió que transporti GNL.

- 22 de juny de 2002. Un camió que transportava GNL va patir un accident a Tivissa, a la província de Tarragona, Espanya. El camió en qüestió va bolcar, suposadament degut a un excés de velocitat, causant un incendi alimentat tant per les fuites de dièsel (gasoil) del motor com del GNL que transportava. Després de 20 minuts el tanc va explotar originant una explosió del tipus BLEVE i, com a resultat, es va produir una bola de foc. El conductor va morir i dues persones, a 200 metres del camió, van patir cremades de primer i segon grau respectivament. Es van trobar fragments del tanc fins a 260 metres de distància del lloc de l'accident.
- 20 d'Octubre de 2011. Un camió cisterna que transportava GNL va patir un accident a Zarzalico, a la província de Múrcia, Espanya. El camió, que carregava 46.000 litres de GNL, va patir l'incendi de la cisterna pràcticament de manera immediata, provocant finalment una BLEVE. Tot i que el conductor del camió va morir, el temps transcorregut entre l'incendi i l'explosió va permetre adoptar mesures de seguretat que van reduir la perillositat de la situació i van evitar que hi haguessin altres persones afectades. [Bonilla, 2012]

Adicionalment, i tot i que no s'ha registrat mai un atac terrorista cap a un vaixell amb GNL, tenint en compte que actualment és una possibilitat real, es pot tenir en compte. A continuació es descriuen dos atacs terroristes marítics, que tot i no tenir relació directa amb el GNL, poden servir per analitzar el perill d'aquestes situacions. [Woodward, 2010]

- 12 d'octubre del 2000. El vaixell *USS Cole* va ser atacat al port d'Aden, Yemen, amb un vaixell carregat d'explosius. Va provocar un forat de 12x18 metres al casc, així com la mort de 17 persones.
- 6 d'octubre de 2002. El petrolier francès *Limburg* va ser atacat amb un forabord carregat d'explosius a Mukalla, Yemen. El vaixell transportava 400.000 barrils de petroli, dels quals en va perdre 90.000. Un membre de la tripulació va morir i van haver-hi 12 ferits.

Els que s'han comentat només són un petit exemple del tipus d'accidents que han ocorregut al llarg de la història. Davant l'impossibilitat d'explicar-los o fer-ne una anàlisi detallada de tots ells, a continuació es mostra una taula resum on es poden veure les diferents tipologies d'accidents, quants n'hi ha hagut, les conseqüències que han ocasionat i la mida dels

vaixells involucrats. Cal dir que aquest és un recull de la tipologia d'accidents més importants succeïts, pot ser que d'altres incidents sense conseqüències no es trobin recollits en la següent taula.

Taula 5.1: Recull d'accidents involucrant GNL.

| Tipologia d'accidents | Núm. d'accidents | Conseqüències | Quantitat involucrada |
|-------------------------------------|------------------|--|---|
| Alta mar | 6 | Danys materials, sense morts, ferits ni fuga de GNL | Vaixells de 125.000 m ³ |
| Amarrats a port | 6 | Danys materials i petites-mitjanes fugues de GNL. Sense morts, ferits ni conseqüències greus. | Vaixells de 70.000 - 125.000 m ³ |
| Instal·lacions de GNL (no vaixells) | 7 | Fuga de GNL, ignició i explosió. Morts i ferits en la majoria d'accidents. La tipologia més perillosa. | Plantes d'emmagatzematge (<i>peak shaving</i>) en la gran majoria de casos. No s'especifica la grandària. |
| Camió de GNL | 2 | BLEVE després d'accident de trànsit. Un mort i dos ferits. | Entre 19.000 - 40.000 kg |

S'observa que els accidents més greus tenen lloc en instal·lacions *on-shore* de GNL, concretament en plantes d'emmagatzematge on el volum de GNL és molt gran. Per contra, els accidents involucrant vaixells de GNL pròpiament dits, no són excessivament greus, causant només danys materials en la majoria de casos.

Els accidents de vaixells amarrats a port, tenen la seva causa primera en un error o fallada durant el procés de càrrega/descàrrega, sent aquest el punt més crític on cal extreure al

màxim les mesures de seguretat.

Per últim, els accidents de camions carregats amb GNL, tot i que se'n han produït molt pocs, es pot dir que serien causats normalment per un esdeveniment inicial com el d'un accident de trànsit. Posteriorment, pot haver-hi fuga de GNL o simplement una part del tanc quedar debilitada, afavorint el desencadenament d'una BLEVE.

Com s'ha pogut observar, no es recull cap tipus d'accident greu d'una unitat FSRU. Aquest fet és degut a que els LNGC han estat operant des dels anys 60, mentre que hi han hagut instal·lacions *on-shore* de GNL des dels anys 20-30. Per contra, la primera unitat FSRU va aparèixer el 2007, a partir de la conversió d'un LNGC. No obstant això, s'ha observat que els accidents més greus s'han patit en instal·lacions *on-shore*, i que els LNGC també han tingut força accidents associats. Tenint en compte que una unitat FSRU incorpora elements que normalment es trobarien en instal·lacions *on-shore*, i que a més a més tenen el component mòbil dels LNGC, són una font potencial de risc. Per aquest motiu, és necessari identificar els punts més vulnerables d'aquestes instal·lacions i fer una anàlisi adequada per tal de minimitzar possibles accidents en el futur.



6. Anàlisi de risc en instal·lacions marítimes de GNL

6.1. Anàlisi qualitativa

Cada operació que involucra GNL és única, i per tant té uns riscos associats únics en funció de les infraestructures, l'espai físic on es realitzi, el volum que hi intervé, etc. Per aquesta raó, és important tenir una metodologia d'avaluació de riscos, per tal d'adaptar les salvaguardes i la metodologia de treball a cada situació.

Per tal de caracteritzar el risc de l'operació en particular, cal poder respondre a una sèrie de qüestions clau:

- Què pot anar malament?
- Quina és la probabilitat de què succeeixi?
- Quines serien les conseqüències?

La freqüència dels esdeveniments se sol expressar en nombre d'esdeveniments per any. Per analitzar la freqüència de qualsevol esdeveniment, cal considerar quants cops es realitza una operació concreta, així com la probabilitat de patir un accident durant l'exposició al perill. En funció de la freqüència es poden definir cinc categories: [ABS, 2014]

Taula 6.1: Categorització de les freqüències d'accidents. [ABS, 2014]

| Categoria segons la freqüència | Descripció |
|--------------------------------|---|
| Pràcticament segur (E) | Succeeix 1 o més cops a l'any. |
| Probable (D) | Succeeix un cop cada 1 - 10 anys. |
| Possible (C) | Succeeix un cop cada 10 -100 anys. |
| Improbable (B) | Succeeix un cop cada 100 - 1.000 anys. |
| Rar (A) | Succeeix un cop cada 1.000 - 10.000 anys. |

A la taula següent es mostra una divisió en cinc categories en funció de la severitat de les conseqüències, tenint en compte el tipus d'impacte que produeix: [ABS, 2014]

Taula 6.2: Categorització de la severitat dels accidents en funció dels seus impactes. [ABS, 2014]

| Categories de severitat | Impactes | | | |
|-------------------------|---|---|---|--|
| | Danys a les persones | Pèrdues econòmiques | Danys mediambientals | Danys a la imatge |
| Baixa (1) | Síntomes lleus a curt termini. No cal tractament. | No cal aturar la planta/operació. Cost < 1.000€. | No hi ha efectes permanents. Dany mínim i limitat. | Petites queixes locals. |
| Lleu (2) | Requereix hospitalització. Efectes reversibles. | No cal aturar la planta/operació. Cost < 10.000€. | Efectes lleus a curt termini a àrees petites. | Atenció de mitjans de comunicació locals. Reputació afectada en zones petites i localitzades. |
| Moderada (3) | Discapacitat irreversible (< 30%). | Cal aturar la planta/operació durant 1-7 dies i/o el cost 10.000€ - 100.000€. | Efectes moderats a curt-mitjà termini sobre àrees considerables. | Atenció dels mitjans de comunicació. Crítiques d'ONG. |
| Major (4) | Mort d'una sola persona o discapacitat irreversible (> 30%). | Cal aturar la planta/operació durant 7-28 dies i/o el cost 100.000€ - 1.000.000€. | Efectes severs contra l'ecosistema. Efectes a mitjà-llarg termini. | Cobertura ampla i negativa dels mitjans de comunicació. Possibilitat de perdre llicències. |
| Crítica (5) | Múltiples morts o efectes irreversibles a la salut de >50 persones. | Cal aturar la planta/operació durant > 28 dies i/o el cost > 1.000.000€. | Efectes molt negatius contra l'ecosistema. Efectes a llarg termini en àrees mediambientalment importants. | Informació internacional del fet. Campanya en contra d'ONG. El preu de les accions es pot veure afectat. |

Les conseqüències d'aquests esdeveniments, es consideren aquells impactes que poden afectar negativament a qualsevol part interessada. Aquestes inclouen les ferides o morts de treballadors o gent externa, danys materials, impactes mediambientals, impactes econòmics i impacte a la reputació de la companyia.

Un cop definida la probabilitat o freqüència i la severitat d'un esdeveniment concret, es pot determinar quin és el valor de risc associat que presenta. A la següent taula es pot observar un exemple de nivells de risc en funció d'aquestes dues característiques. Aquest tipus de classificació és només orientativa, ja que cada operador i cada tipus d'impacte pot tenir unes consideracions i toleràncies al risc diferents. És important que aquest tipus d'anàlisi s'adapti a cada organització en concret. [ABS, 2014]

Taula 6.3: Categorització del risc d'accidents. [ABS, 2014]

| Probabilitat | Conseqüències | | | | |
|--------------|---------------|---------|---------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| E | Mitjà | Mitjà | Alt | Alt | Alt |
| D | Moderat | Mitjà | Mitjà | Alt | Alt |
| C | Baix | Moderat | Mitjà | Alt | Alt |
| B | Baix | Baix | Moderat | Mitjà | Alt |
| A | Baix | Baix | Baix | Mitjà | Mitjà |

Normalment els accidents succeeixen a causa d'una cadena d'esdeveniments que acaba amb un o més efectes no desitjats. Aquesta cadena d'esdeveniments comença amb un perill que té el potencial de causar conseqüències negatives, sense un perill inicial no hi haurà conseqüències. Tanmateix, perquè això acabi succeint, cal sempre la fallada d'un o diversos equips, error humans o efectes externs. Cada accident té com a mínim una conseqüència final no desitjada, amb un efecte objectiu i mesurable. La possibilitat o no d'arribar a aquest esdeveniment final es veu afectada per la presència de salvaguardes i el fet que aquestes funcionin correctament o no. [ABS, 2014]

Per tal de seleccionar el millor mètode de càrrega de combustible, caldria identificar els perills potencials, les causes i conseqüències d'aquests, així com les salvaguardes més

apropiades, mitjançant una metodologia sòlida i estructurada. Un exemple d'estructura per l'anàlisi de riscos seria la següent:

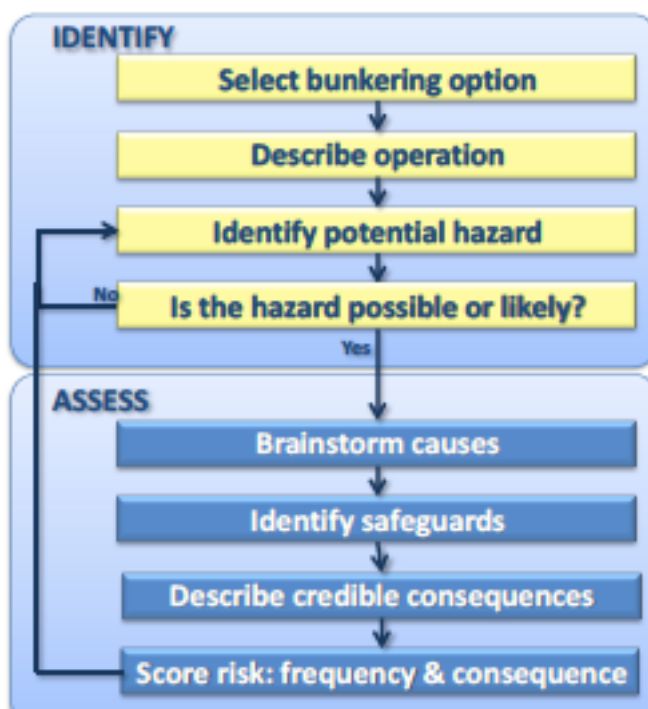


Figura 6.1: Estructura d'anàlisi de riscos. [ABS, 2014]

6.2. Anàlisi quantitativa

Per tal d'analitzar el risc associat i les conseqüències d'un possible accident amb GNL, concretament a una planta *off-shore* com una FSRU, podem analitzar els diferents escenaris possibles i veure'n la probabilitat/freqüència de cadascun d'ells.

Es contemplen bàsicament tres dimensions de fuites possibles:

- Petita: forat equivalent a un diàmetre de 10mm.
- Mitjana: forat equivalent a un diàmetre de 25mm.
- Gran: forat equivalent a un diàmetre més gran que el 10% del diàmetre de la canonada/mànega analitzada.

La ruptura total d'una canonada en un FSRU s'exclou dels possibles escenaris per la baixíssima probabilitat del fet que succeeixi, derivat de les precaucions que es prenen durant el disseny d'aquestes instal·lacions. Així mateix, les característiques estructurals dels tancs d'emmagatzematge, així com l'anàlisi històrica, mostren que l'escenari on hi ha una fuga de GNL des del mateix tanc és pràcticament impossible. [Pitblado, 2004]

Tot i que s'han estudiat diverses anàlisis quantitatives de risc en unitats FSRU, tal com [Ramos et al., 2011] i [Parihar et al., 2011], en aquest apartat ens centrarem en el realitzat per [Vianello, 2014]. Els números exactes entre anàlisis poden variar, per lo qual aquí només es mostren les dades numèriques de l'article que per data i per contingut és més interessant.

Les conseqüències i freqüències dels diferents escenaris s'estudien a través d'un arbre d'esdeveniments, el qual les permet mostrar de manera gràfica a partir d'un esdeveniment iniciador. A continuació es mostra l'arbre d'esdeveniments genèric per una fuga de GNL.

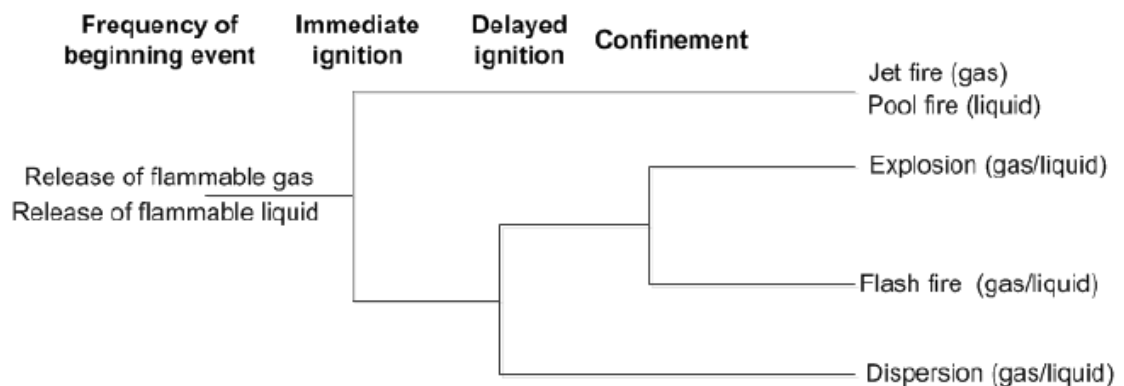


Figura 6.2: Arbre d'esdeveniments genèric per una fuga de GNL. [Vianello, 2014]

Per tal de determinar la freqüència de cadascun dels escenaris possibles, s'utilitzen bases de dades disponibles a la literatura. [API, 2008] [Cox, 1990] Aquesta es calcula mitjançant l'anàlisi d'arbre d'esdeveniments, utilitzant les freqüències d'ignició, explosió, flash fire i condicions ambientals. A la taula inferior es mostren les probabilitats d'ignició en funció del cabal de la fuga de GNL.

Taula 6.4: Probabilitats d'ignició en funció del cabal de la fuga. [API, 2008]

| Cabal [kg/s] | Probabilitat d'ignició [-] | |
|--------------|----------------------------|-----------------|
| | Fuita de gas | Fuita de líquid |
| < 1 | 0,01 | 0,01 |
| 1 - 50 | 0,07 | 0,03 |
| > 50 | 0,30 | 0,08 |

A la taula 6.5 es poden observar les probabilitats d'explosió i de flamarada en funció de la massa inflamable disponible.

Taula 6.5: Probabilitats d'explosió i de flash fire en funció de la massa inflamable disponible. [Cox, 1990]

| Massa inflamable [kg] | Probabilitat d'explosió [-] | Probabilitat de flash fire [-] |
|-----------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| < 100 | 0 | 0,01 |
| 100 - 1000 | 0,001 | 0,03 |
| > 1000 | 0,03 | 0,10 |

Per tal de determinar la probabilitat que s'ha d'utilitzar en els arbres d'esdeveniments, és necessari determinar el cabal de la fuga i la massa per a cada esdeveniment particular. [Vianello, 2014] A la següent taula es recullen els diferents escenaris possibles i la freqüència dels seus esdeveniments iniciadors, així com les conseqüències, la probabilitat del fet que succeeixin i la freqüència d'aquests.

Taula 6.6: Freqüència dels diferents escenaris per a cada esdeveniment iniciador. [Vianello, 2014]

| Esdeveniment iniciador (fuita) | Freqüència de fuita [any^{-1}] | Escenari | Probabilitat | Freqüència [any^{-1}] |
|--|---|------------|--------------|----------------------------------|
| Mànega de subministrament | $1,51 \cdot 10^{-5}$ | Pool fire | 0,3 | $2,94 \cdot 10^{-7}$ |
| Canonada de transferència al tanc | $2,25 \cdot 10^{-5}$ | Jet fire | 0,3 | $4,39 \cdot 10^{-8}$ |
| | | Flash fire | 0,0027 | $6,08 \cdot 10^{-9}$ |
| | | Explosió | 0,000091 | $2,05 \cdot 10^{-9}$ |
| Emmagatzematge de GNL | $4,00 \cdot 10^{-5}$ | Flash fire | 0,0001 | $4,00 \cdot 10^{-9}$ |
| Línia de retorn de vapor al vaixell | $2,25 \cdot 10^{-5}$ | Jet fire | 0,07 | $1,02 \cdot 10^{-7}$ |
| | | Flash fire | 0,000093 | $2,09 \cdot 10^{-9}$ |
| Línia de retorn de gas del compressor | $3,01 \cdot 10^{-5}$ | Jet fire | 0,07 | $1,37 \cdot 10^{-7}$ |
| | | Flash fire | 0,000093 | $2,80 \cdot 10^{-9}$ |
| Línia de baixa pressió entre els tancs i les bombes d'alta pressió | $3,77 \cdot 10^{-5}$ | Jet fire | 0,07 | $1,71 \cdot 10^{-7}$ |
| | | Flash fire | 0,00086 | $3,24 \cdot 10^{-8}$ |
| Línia d'alta pressió al vaporitzador | $3,77 \cdot 10^{-5}$ | Jet fire | 0,07 | $1,71 \cdot 10^{-7}$ |
| | | Flash fire | 0,0012 | $4,52 \cdot 10^{-8}$ |
| Línia de gas de sortida del vaporitzador | $9,8 \cdot 10^{-6}$ | Jet fire | 0,3 | $1,91 \cdot 10^{-7}$ |
| | | Flash fire | 0,00091 | $8,91 \cdot 10^{-9}$ |

Tenint en compte que el valor llindar d'acceptació del risc és de 10^{-6} , es pot considerar que el risc associat a una instal·lació FSRU és acceptable.

Cal tenir en compte, a més a més, que les freqüències més elevades, de l'ordre de 10^{-7} , estan associades a jet fires, el qual té una probabilitat de mort d'aproximadament el 6,5% (respecte al 100% de letalitat d'un *flash fire* (flamarada) o una explosió).

7. Simulació de l'explosió

Per a poder analitzar les conseqüències que podria tenir un accident involucrant GNL en una planta FSRU, s'han utilitzat dos mètodes clàssics: TNT equivalent i multi-energia. Complementàriament, també s'ha utilitzat el software de simulació FLACS.

Aquesta eina està basada en CFD (*Computational Fluid Dynamics*), una branca de la mecànica de fluids que utilitza mètodes numèrics i algorismes per tal de resoldre i analitzar problemes que involucren un flux de fluids, amb reacció química o sense. La gran majoria d'eines CFD, incloent FLACS, utilitzen models de turbulència basats en equacions RANS (*Reynolds-averaged Navier Stokes*), com el model $\kappa - \epsilon$ [Launder & Spalding, 1974]. Aquests es complementen amb models de sub-malla, els quals tenen en compte la influència d'objectes que no poden ser resolts a la malla computacional. Per sistemes turbulents reactius, cal afegir models per reaccions químiques. [Hjertager, 1982]

Molts dels perills als quals s'enfronta de manera potencial la societat, especialment en la indústria de processos, involucren escenaris accidentals on el flux de fluid és complex. Aquí és on entra el software de simulació FLACS. Està especialment dissenyat per tal de millorar la seguretat de processos on pugui acabar havent-hi: [Mannan, 2012]

- Pèrdua de contenció, total o parcial, i dispersió d'un material gasos, líquid i/o sòlid, el qual és inflamable, asfixiant, tòxic i/o radioactiu.
- Explosions de gas, d'un núvol de vapor, de pols, etc.
- Detonació de substàncies explosives i propagació d'ones de sobrepressió.
- Pool i Jet fires.

Les eines CFD, com el software FLACS, representen l'estat de l'art actualment en l'anàlisi de conseqüències on es veuen involucrats fluids. En algunes situacions, models més simples i ràpids tendeixen a sobreestimar o subestimar les conseqüències en 10 vegades o més [Zalosh, 2008], fins i tot quan s'utilitzen tenint en compte les recomanacions del creador del model.

Tanmateix, com totes les eines de simulació, aquesta també té les seves limitacions. És de vital importància tenir en compte fins a quin punt les prediccions del model són prou realistes i acurades, per tal d'implementar les mesures de seguretat les més adients i proporcionades possible.

Per tal d'aconseguir la millor fiabilitat, cal incloure suficients detalls del model geomètric de la planta/instal·lació. En el cas d'una simulació d'una planta amb un escenari d'uns 100m, cal arribar a nivells de detall de fins a 2-3cm pel que fa a mesures de canonades i d'altres equipaments. Per moltes instal·lacions modernes, és possible importar l'estructura geomètrica a través d'arxius CAD (*Computer Aided Design*). En cas que siguin instal·lacions més antigues, o una anàlisi d'una nova construcció, cal buscar solucions alternatives.

A l'hora de fer representacions de geometries complexes en FLACS, cal tenir en compte algunes precaucions: [Gexcon, 2015]

- Cal verificar sempre el model geomètric abans de començar a realitzar simulacions, ja que si aquest s'ha importat de manera directa, poden haver-hi problemes amb les conversions d'unitats i amb objectes no-físics.
- El model de turbulències de FLACS no suporta objectes inclinats. En cas de voler simular un objecte amb aquesta geometria, la millor opció és aproximar-lo a una versió ortogonal d'aquest.
- Importar models geomètrics directament des de CAD pot no funcionar correctament per geometries internes, com per exemple l'interior d'equipaments com sitges, molins, canonades, etc.
- Una geometria ideal per utilitzar amb FLACS hauria d'estar composta a base de caixes i cilindres, tot i que poliedres convexos i cons truncats també es poden utilitzar. Tot i això, primer cal fer una conversió de cons truncats a poliedres convexos, mitjançant eines del propi programari.
- Les parets del model geomètric han de seguir les coordenades axials. En cas de tenir una rotació respecte aquests angles, poden haver-hi problemes durant la simulació.
- És important representar correctament les obertures de ventilació en geometries semi-confines. Si el càlcul de porositats que realitza el propi FLACS ajusta la posició dels objectes a la divisió de la malla més propera, l'àrea de ventilació real del model es veurà afectada. Per evitar-ho, cal comprovar les representacions de les obertures de ventilació mitjançant la verificació del camp de porositats, tant en el preprocessador CASD (*Computer Aided Scenario Design*) com en el post-processat.

7.1. Disseny de la simulació

En aquest apartat es mostra el disseny de l'escenari que es simularà, així com l'estructura de la malla, els punts i variables a monitorar i d'altres consideracions.

L'escenari triat representarà una situació d'una unitat FSRU i un LNGC, amb amarratge directe a port i cada vaixell a un costat d'aquest moll. Tal i com s'ha comentat durant el punt 6, aquesta no és la situació ideal, degut a la major proximitat del personal de terra i a la major possibilitat d'efecte dominó. No obstant això, aquesta encara és una configuració força utilitzada avui dia, per lo que és de vital importància observar quines són les possibles conseqüències d'una fuga de GNL en un amarratge d'aquestes característiques.

Per tal de permetre la modelització d'aquesta configuració, es realitza una simplificació de la geometria, però mantenint tots els elements d'aquesta presents. A la imatge 7.1 que es troba a continuació es pot observar una comparativa entre l'estructura a dissenyar i la seva representació a FLACS.

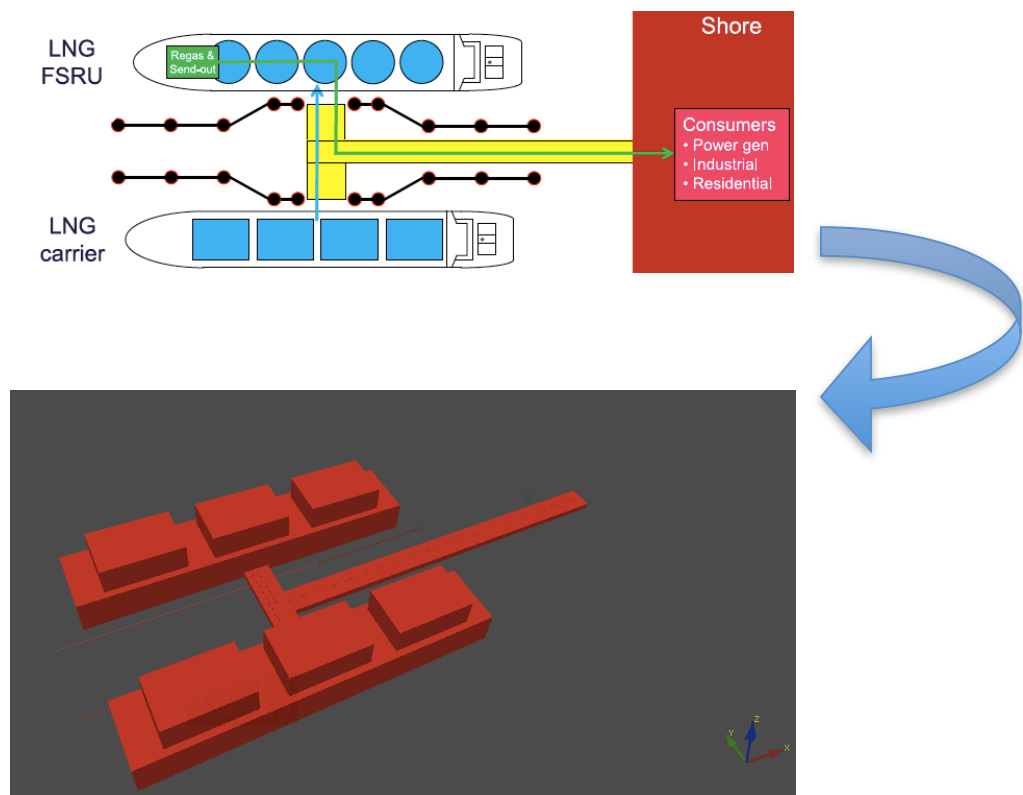


Figura 7.1: Representació a FLACS de l'estructura a estudiar.

La representació incorpora dues estructures rectangulars de 260x50x25m que representen els vaixells. A sobre de cadascun d'ells, hi han 3 rectangles de dimensions 60x40x15m, que

representen els dipòsits de GNL que incorpora cada vaixell. Els connecta una plataforma de 20x80x5m, la qual alhora incorpora dues canonades, una que connecta tots dos vaixells i l'altre que surt del LNG FSRU i va directe a terra ferma. Tant aquestes canonades, com les que circulen paral·leles als dos vaixells (en aquest cas simplificades a nivell del mar), tenen 1m de diàmetre. Finalment, l'estructura que connecta la plataforma central amb el terra ferma, té unes dimensions de 20x300x5m.

Per tal d'analitzar que succeeix a cada punt de l'estructura, es crea una malla que cobreix tot l'espai a analitzar. La mida de les cel·les, així com la variació que pateix la malla en funció de la distància a la que es troba del centre de l'estructura, s'han dissenyat per tal d'aconseguir un número de cel·les totals d'entre 100.000 i 150.000. Aquesta quantitat ens permet simular amb un temps suficientment curt, d'entre 1 i 3 dies, i amb un nivell de detall suficientment curós. A la figura 7.2, que es mostra a continuació, es pot veure una distribució d'aquesta malla.

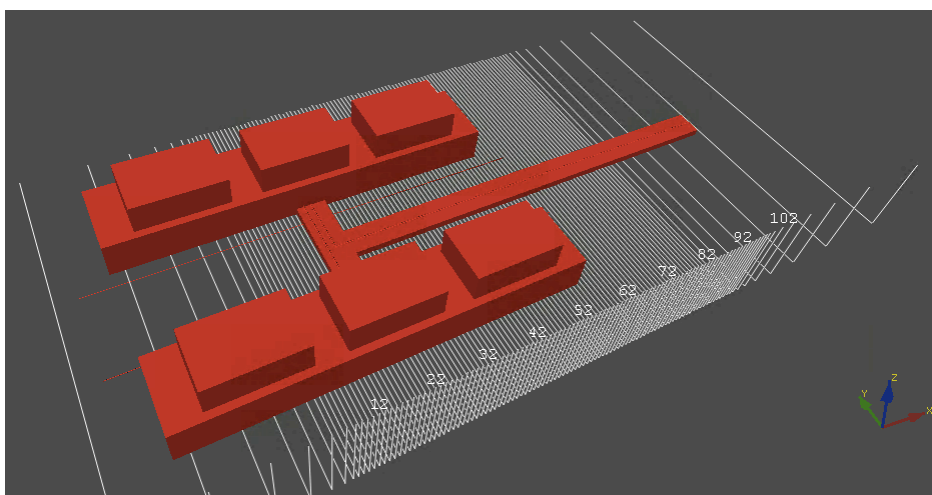


Figura 7.2: Distribució de la malla al llarg de l'estructura a analitzar.

S'observa com a les zones més properes a la descarrega del GNL la malla és més compacte, mentre que quan més allunyada està de la zona central més ampla es torna. Això és degut a que la zona de descàrrega del GNL és on és més probable que es produeixi un fuita i, per tant, és el punt que cal analitzar amb més deteniment. Pel que fa a la zona més exterior, on acaba l'estructura que connecta la plataforma central amb terra ferma, l'únic que és necessari és observar si al final de la mateixa hi ha un efecte suficient com per ferir a persones alienes a l'operació.

L'incident a analitzar serà la fuita de 1.000 m^3 de GNL, uns 440.000 kg [Sedigas, 2016], degut a la ruptura total d'una vàlvula durant la descàrrega del mateix. Aquest és un cas similar al produït el 1977, a Algèria. [CH-IV International, 2012] El pitjor dels casos possibles

és que aquesta fuga evapori totalment i passi a ser un núvol de GN, amb un volum d'uns 600.000 m³, i posteriorment trobi un punt d'ignició i provoqui una explosió.

El núvol en qüestió, estarà localitzat a la posició (60, 50, 0) i tindrà unes dimensions de 250x80x30m. A la imatge 7.3 que es mostra a continuació es pot observar la posició i dimensió d'aquest núvol juntament amb la resta de la estructura.

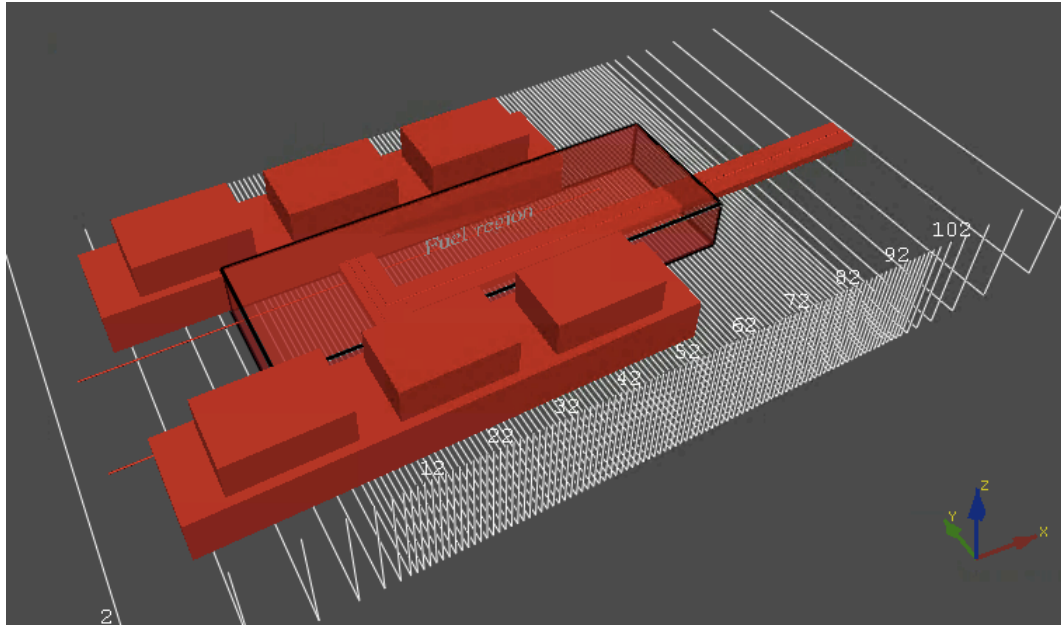


Figura 7.3: Núvol de GN degut a una fuga de GNL per la ruptura d'una vàlvula.

S'assumeix que a l'interior del núvol hi ha una concentració lleugerament superior a l'estequiomètricament necessària per produir l'explosió. Aquest fet assegura una major reactivitat del núvol durant la simulació i, altre cop, ens permet situar-nos en el pitjor escenari possible. La composició del núvol s'assumeix d'un 91,7% de metà, un 7% de età i un 1,3% de propà. [UnionGas, 2017]

7.2. Mètode del TNT equivalent

En primer lloc s'ha dut a terme una aproximació amb el mètode del TNT equivalent. Aquest mètode pot ser menys exacte que altres de més complicats i més difícils d'aplicar, però suposa una aproximació important a tenir en compte.

Aquest mètode consisteix a transformar la massa de combustible en una massa equivalent de TNT i, a continuació, tenint en compte la distància a la que es vol estudiar l'efecte de

l'explosió en qüestió, es calcula una distància escalada. Les equacions per dur a terme aquest procés es mostren a continuació. [Casal, 2008]

Massa equivalent de TNT:

$$M_{TNT} = \alpha \cdot M \cdot \frac{H_c}{H_{TNT}} \quad (\text{Equació 7.1})$$

Distància escalada:

$$d_n = \frac{d}{\sqrt[3]{H_{TNT}}} \quad (\text{Equació 7.2})$$

On:

M: Massa de combustible implicada. [kg]

H_c : Calor de combustió del combustible (poder calorífic inferior). [J/kg]

α : Rendiment de l'explosió (entre un 3% i un 5%). [-]

d: Distància des del centre de l'explosió. [m]

d_n : Distància escalada. [$m \cdot kg^{-1/3}$]

Un cop calculada la distància escalada per al núvol de gas que es vol analitzar, s'utilitza el gràfic que es mostra a continuació (figura 7.4) per determinar la sobrepressió que aquesta explosió produirà a la distància analitzada.

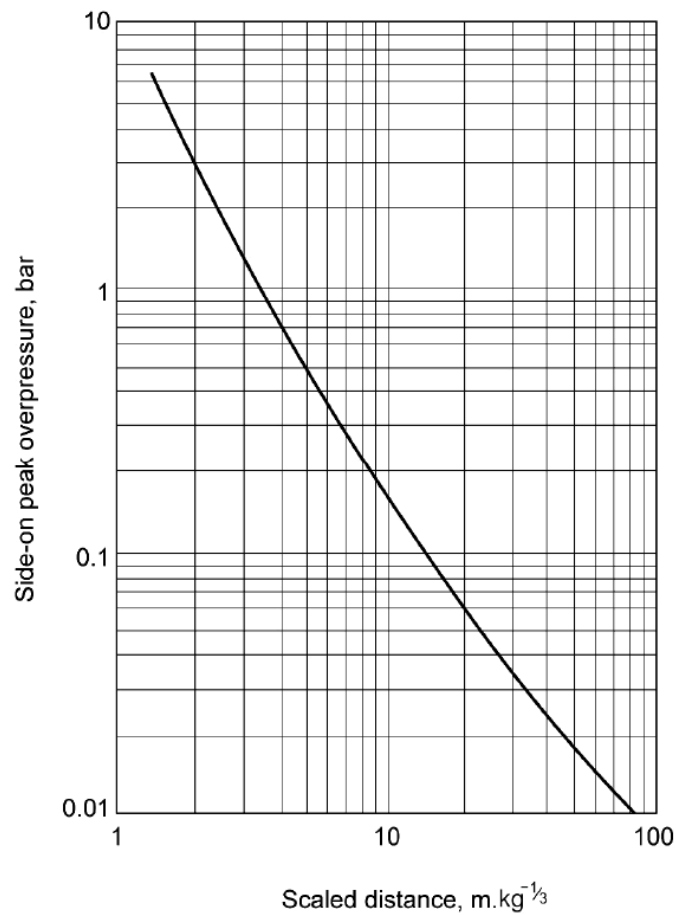


Figura 7.4: Sobrepressió produïda en funció de la distància escalada. [Casal, 2008]

Un cop obtingut el valor de sobrepressió que patiran les persones que es trobin a la distància seleccionada, es pot determinar quines seran les conseqüències que patiran, segons les equacions Pròbit següents:

Hemorràgia pulmonar:

$$Y = -77,1 + 6,91 \cdot \ln(\Delta P) \quad (\text{Equació 7.3})$$

Ruptura de timpà:

$$Y = -12,6 + 1,524 \cdot \ln(\Delta P) \quad (\text{Equació 7.4})$$

On:

ΔP : Sobrepressió. [Pa]

Y: Valor Pròbit per introduir a la taula. [-]

A partir del valor obtingut amb totes dues equacions, i utilitzant la taula Pròbit, obtindrem quin tant per cent de la gent afectada patirà les conseqüències pre-establertes. La taula Pròbit utilitzada es mostra a la taula 7.1 que es troba a continuació:

Taula 7.1: Taula Pròbit. [Casal, 2008]

| % | 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 |

Tenint en compte el cas que s'estudiarà, el qual contempla un núvol de GN d'uns 440.000 kg, s'obté una massa de TNT equivalent de 199.220 kg aproximadament, suposant un rendiment de l'explosió d'un 4%.

Si s'analitzen les conseqüències a 250 m, distància aproximada a partir de la qual hi hauria gent aliena al procés de descàrrega de GNL, s'obté una distància escalada de $4,28 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$. Utilitzant el gràfic que s'ha presentat anteriorment, aquesta distància escaldada equival a una sobrepressió d'aproximadament 0,7 bar.

Si es calcula 'Y' utilitzant les equacions Pròbit, tant per hemorràgia pulmonar com per perforació per timpà, s'obté un valor de -0,01 i de 4,4 respectivament. Segons la taula Pròbit això equivaldria a dir que ningú moriria a causa d'aquesta sobrepressió a 250 m, però que aproximadament el 27-28% de la gent afectada patiria perforació al timpà.

7.3. Mètode Multi-Energia

L'anàlisi de diferents explosions de vapor estudiades fins avui dia sembla indicar que el dany provocat per les explosions degut a la sobrepressió no està directament relacionat amb la quantitat de combustible que hi ha en el núvol, sinó que la relació depèn en gran manera del grau de confinament d'aquest. És a dir, les conseqüències de les explosions estan més relacionades amb la forma, mida i naturalesa de les parts del núvol que estan confinades o semi-confinades. Per contra, les parts del núvol sense confinament pràcticament no contribueixen de manera significativa a la sobrepressió. [Pietersen, 1990] [Hymes, 1983]

Segons aquest model, el del núvol confinat es converteix en un hemisferi d'igual volum que el núvol (la forma i dimensions del núvol inflamable es poden estimar mitjançant models de dispersió atmosfèrica, com que el FLACS incorpora). El mètode multi-energia considera que aquest hemisferi és una barreja homogènia d'hidrocarburs i aire en proporcions estequiomètriques. S'assumeix un valor mitjà de $0,1 \text{ kg/m}^3$ de la barreja hidrocarbur-aire, el que equival a una energia de combustió mitjana de $3,5 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3$.

A la figura 7.5 que es mostra a continuació, es pot observar com varia el pic de sobrepressió en funció de la distància escalada basada en l'energia de combustió, per 10 forces d'explosió diferents.

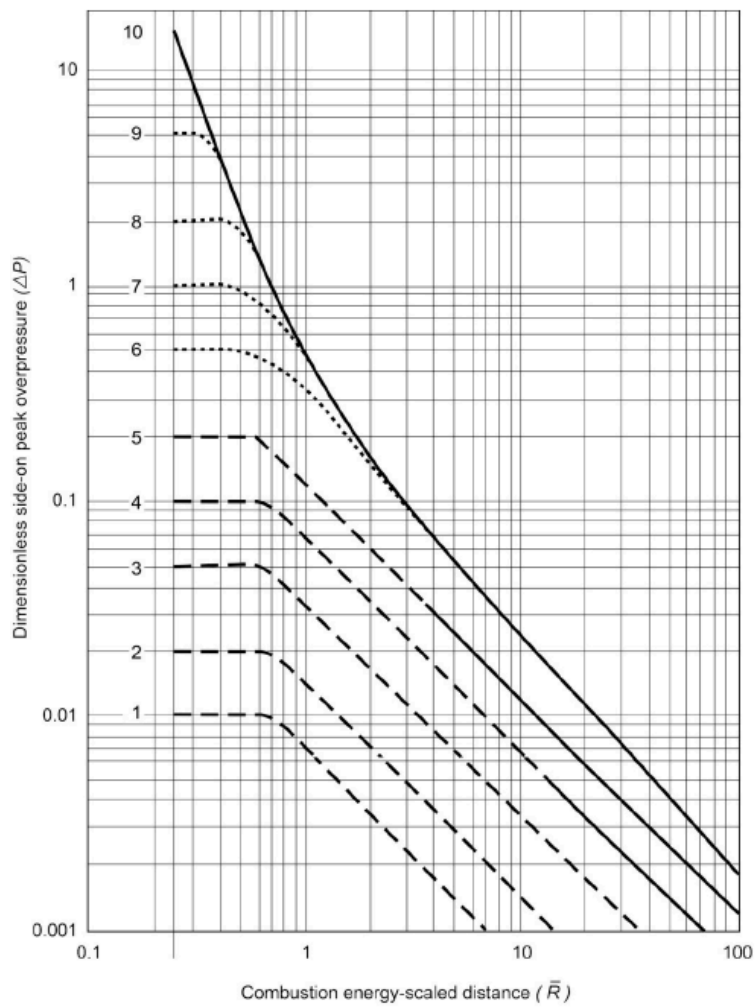


Figura 7.5: Pic de sobrepressió en funció de la distància escalada basada en l'energia de combustió.
[Casal, 2008]

El procés a seguir per aplicar el mètode de multi-energia, seria el següent: [Casal, 2008]

- Determinar la mida del núvol.
- Identificar les àrees amb confinament.
- Establir la "força" de l'explosió en funció del grau de confinament.
- Calcular l'energia involucrada.

$$E = 3,5 \cdot 10^6 \cdot V \quad (\text{Equació 7.4})$$

On:

E: Energia involucrada. [J]

V: Volum del núvol a la zona analitzada. [m³]

- Seleccionar la força de l'explosió, en funció de les característiques de la planta. Per zones amb confinament s'utilitza habitualment la corba 7 (també pot ser 8 o 6, en funció de les característiques de la planta). En el cas de zones no confinades s'utilitzarà la corba número 3.
- Calcular la distància escalada basada en l'energia de combustió (o "distància escalada de Sachs").

$$R = \frac{d}{\left(\frac{E}{P_{atm}}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (\text{Equació 7.5})$$

On:

d: Distància des del centre de l'explosió al punt on es vol calcular la sobrepressió.

P_{atm}: Pressió atmosfèrica. [101.325 Pa]

R: Distància escalada basada en l'energia de combustió.

- Utilitzar el valor de R per entrar a la gràfica i, utilitzant la corba adequada, obtenir el valor de ΔP. (ΔP = ordenada · 101.325 Pa).

7.4. Anàlisi de resultats

A continuació es presenten els resultats obtinguts amb els diferents mètodes de càlcul: TNT equivalent, multi-energia i FLACS. Primerament s'estudiarà la validesa dels diferents models per un cas de referència, del qual se'n coneix el resultat real a obtenir. A continuació, s'analitzarà per tots tres mètodes l'escenari portuari dissenyat anteriorment.

7.4.1. Comparativa de models en l'escenari prefixat

La situació que es compararà és un exemple que FLACS dóna com a situació estàndard

d'explosió d'un núvol de gas natural.

L'estructura té un elevat confinament i en el centre d'aquesta hi ha un núvol de 1.640 m³ (25,6x8x8 m) de GN, a partir d'una fuga de GNL, el qual està totalment confinat. En el centre del núvol es produeix una ignició, fent-lo explotar. S'analitza la sobrepressió que pateix una persona a una distància de 12 m (límit de l'estructura) i a 24 m (completament fora de l'estructura).

A la següent taula 7.2, es pot observar la comparativa de la sobrepressió deguda a l'explosió per 12 i 24 m, segons cada un dels mètodes utilitzats.

Taula 7.2: Comparativa dels diferents mètodes per un exemple prefixat.

| | FLACS | TNT equivalent | Multi-Energia |
|------------------------|-------|--|--------------------------------|
| ΔP (bar) - 12m | 2 | 4,5 (rendiment 5%) 4 (rendiment 4%) | 1 (corba 7) 2 (corba 8) |
| ΔP (bar) - 24m | 0,4 | 1,7 (rendiment 5%) 1,1 (rendiment 4%) | 0,9 (corba 7) 0,5 (corba 6) |

Tant pel cas del mètodes del TNT equivalent com pel mètode de multi-energia s'han utilitzat dues variants.

En el cas del TNT equivalent, degut a que l'explosió es produeix en un espai confinat, el rendiment de l'explosió ha de ser elevat. S'analitza aquest exemple per dos dels rendiments més alts, 5% i 4%.

En el cas del mètode de multi-energia, per situacions d'alt confinament s'utilitzen les corbes 6, 7 i 8. S'ha escollit analitzar per la corba intermitja, la número 7, i per una de les dues corbes que més s'ajusti a la sobrepressió esperada.

En aquest cas concret els resultats que proporciona FLACS són molt pròxims al reals, ja que és un exemple que inclou el propi software. Utilitzant aquests valors com a referència, es pot observar com el mètode del TNT equivalent, sigui quin sigui el rendiment utilitzat, sempre sobre-estima la sobrepressió produïda per l'explosió. En el cas del mètode multi-energia, utilitzant la corba 7, la més estàndard, sempre hi ha una desviació del valor real. No obstant això, utilitzant la corba 8 en el primer cas i la corba 6 pel segon, s'observa que els resultats

obtinguts concorden força bé amb els obtinguts amb FLACS.

L'ús d'una corba o una altre en el mètode multi-energia depèn molt de les característiques de la planta. Tenint en compte això, els valors trobats amb el aquest mètode són força ajustats als que prediu FLACS. Fins ara, el mètode més àmpliament utilitzat i estudiat per la predicció de sobrepressions degut a explosions, ha estat el mètode multi-energia, per lo que es pot dir que les simulacions amb FLACS concorden amb els resultats del mètode més fiable.

Cal tenir en compte aquí que les prediccions de la sobrepressió en explosions de núvols inflamable tenen sempre un cert grau d'imprecisió, atès que depenen del rendiment mecànic i aquest depèn de les circumstàncies: forma del núvol, grau de confinament (que pot variar el llarg del mateix), homogeneïtat o heterogeneïtat de la barreja gas/aire, situació del punt d'ignició, etc. per tant en definitiva cal assumir que la predicció pot considerar-se només una aproximació.

7.4.2. Comparativa de models en un escenari portuari

En el següent apartat es comparen els valors de sobrepressió degut a l'explosió d'un núvol de GN de 600.000 m³, a partir d'una fuga de GNL, a l'estructura portuària dissenyada en FLACS. Malauradament, només s'ha pogut comparar l'ús dels mètodes TNT equivalent i multi-energia, ja que la simulació amb FLACS retornava valors incoherents. No obstant això, donat que en l'apartat 7.4.1 s'ha pogut observar la bona correlació de resultats entre FLACS i el mètode multi-energia, es pot utilitzar aquest últim com a referència.

S'analitzarà la sobrepressió produïda per aquesta explosió a quatre distàncies diferents: 250, 200, 150 i 100 metres. La posició més allunyada, de 250 m, correspon al final de la passarel·la, on començaria la resta de la terminal portuària. Les altres distàncies es van aproximant al límit exterior del núvol, que equival aproximadament a la distància de 150 m. Finalment, la distància de 100 m des del centre de l'explosió ja correspon un punt a l'interior del núvol. Es pot observar de manera més esquemàtica a la figura 7.6 que es mostra a continuació.

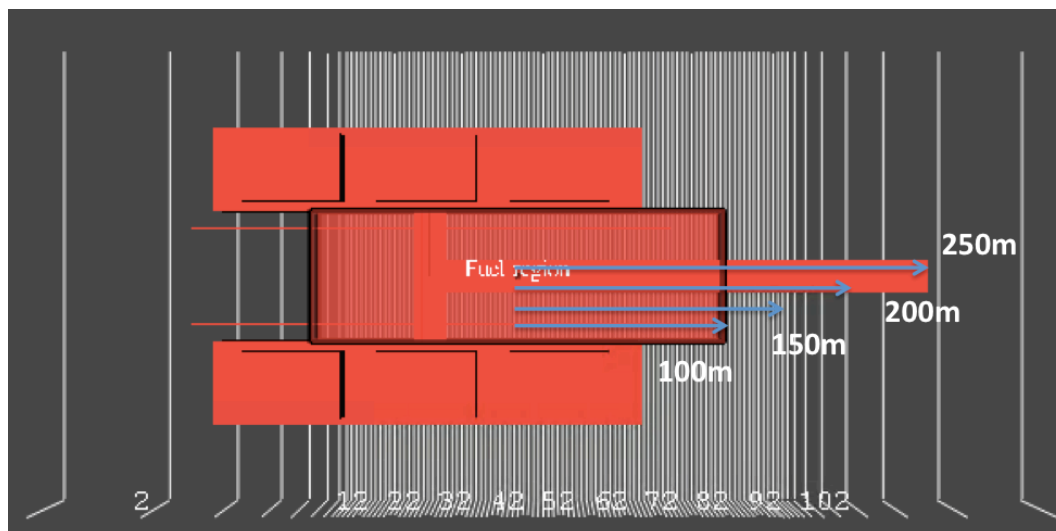


Figura 7.6: Posició aproximada dels punts a analitzar en l'estructura portuària.

A la següent taula 7.3 es poden observar els resultats obtinguts.

Taula 7.3: Comparativa dels diferents mètodes per un exemple prefixat.

| | TNT equivalent | Multi-energia |
|--------------------------|----------------|----------------|
| ΔP (bar) – 250 m | 0,7 | 0,47 |
| ΔP (bar) – 200 m | 0,85 | 0,62 |
| ΔP (bar) – 150 m | 1,5 | 0,94 |
| ΔP (bar) – 100 m | 4 | 1,05 (corba 7) |
| | | 2,05 (corba 8) |

El mètode del TNT equivalent ha estat calculat amb un rendiment d'un 4%, ja que hi ha part del núvol que pràcticament no està confinat. D'altra banda, la part del núvol amb confinament en el mètode multi-energia s'ha calculat amb la corba número 7 (la més estàndard), excepte en el últim escenari a 100 m, on també s'ha utilitzat la corba 8. La part del núvol sense confinament s'ha calculat en tots els casos amb la corba número 3. Aquesta selecció s'ha efectuat en base a l'estudi comparatiu efectuat prèviament.

A les següents figures 7.7 i 7.8 es pot observar una representació gràfica de les dades anteriors, variació del pic de sobrepressió en funció de la distància. La sobrepressió a $d = 100$ m s'ha calculat mitjançant la corba 7 (figura 7.7) i mitjançant la corba 8 (figura 7.8).

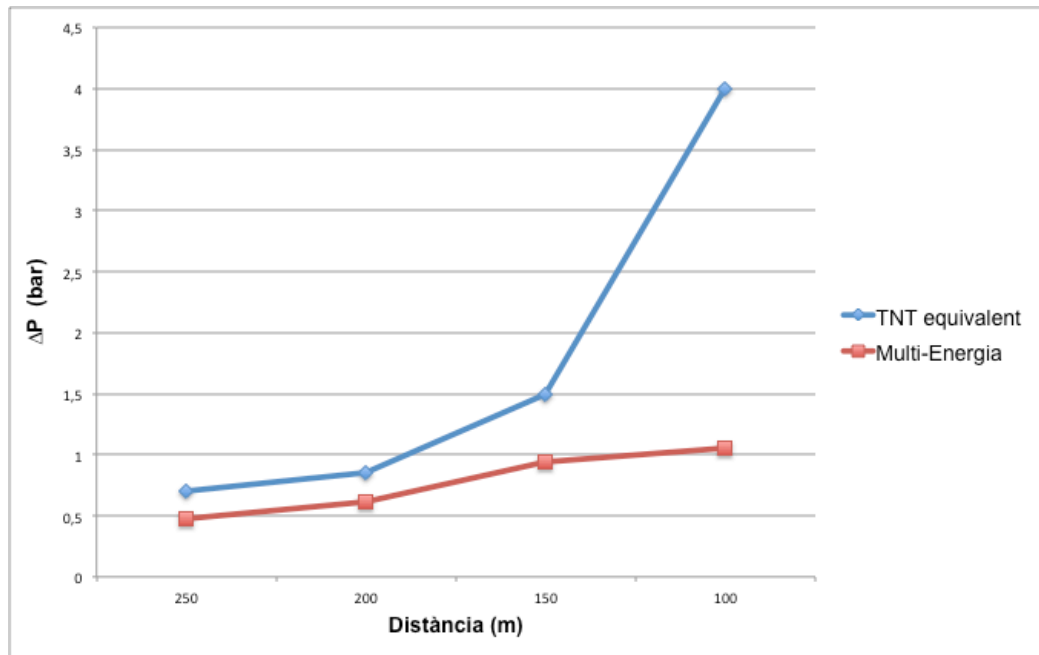


Figura 7.7: Representació gràfica de la comparativa dels diferents mètodes per un exemple prefixat.

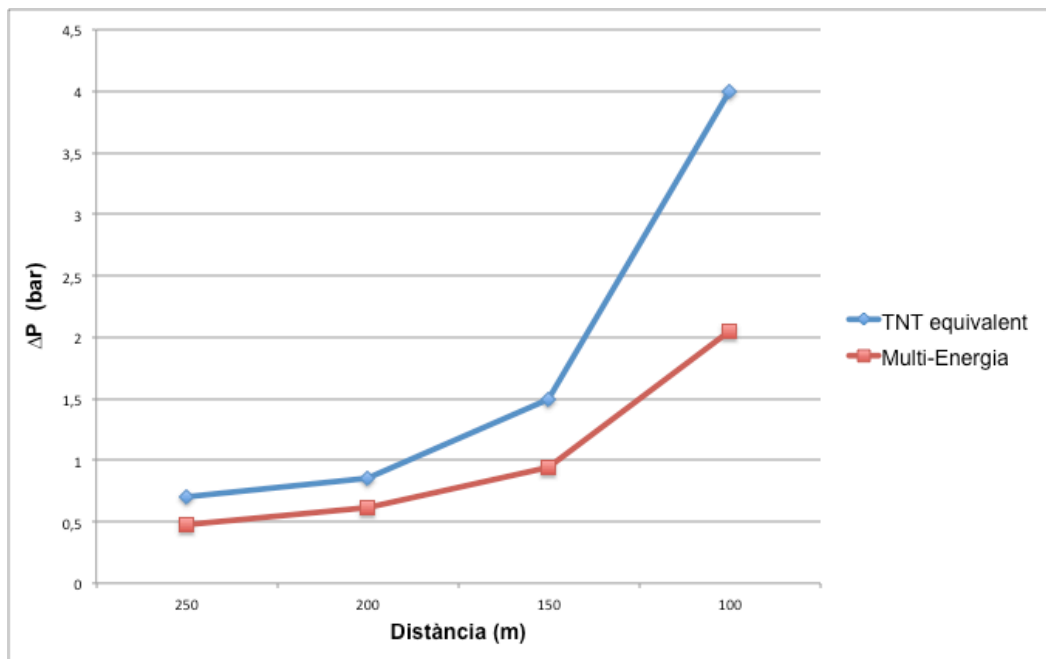


Figura 7.8: Representació gràfica de la comparativa dels diferents mètodes per un exemple prefixat.

S'observa com en tots els casos el mètode de TNT equivalent mostra uns valors de sobrepressió superiors als del mètode multi-energia, fet que concorda amb el vist en l'apartat anterior. El gràfic que es mostra a la figura 7.8, utilitzant la corba 8 del multi-energia, mostra una tendència més similar al mètode de TNT equivalent que no pas el de la corba 7, però amb valors força inferiors.

Utilitzant els valors obtinguts amb el mètode multi-energia, es pot trobar el % de gent que morirà en aquesta situació, utilitzant les equacions Pròbit. Per les dues distàncies més allunyades, de 250 m i 200 m, el valor de la funció Pròbit és negatiu, és a dir, que no hi haurà cap mort.

En el cas de la posició que està al llindar del núvol, a 150 m del centre de l'explosió, el Pròbit és positiu però inferior a 2,67, és a dir, que tampoc hi haurà cap mort. Només en l'últim cas, ja a l'interior del núvol i a 100 m de l'explosió, el Pròbit és positiu. En cas d'utilitzar la corba 7, la sobrepressió és d'1 bar, fet que retornar un valor Pròbit de 2,9, el que equival a una mortalitat d'un 2% aproximadament. En canvi, si s'utilitza la corba 8, la sobrepressió és de 2 bar, amb un valor Pròbit de 7,5, donant una mortaldat del 99,5% aproximadament. En tot cas, cal tenir en compte que per a la zona situada dins la zona coberta pel núvol la mortalitat seria del 100% degut no a la sobrepressió sinó a l'acció de la flamarada.

Com ja s'havia vist en l'apartat anterior, i tal i com es torna a confirmar en aquest, la selecció de la corba en el mètode multi-energia és una part molt crítica de l'anàlisi de risc, ja que utilitzar una o l'altre pot donar valors de sobrepressió radicalment diferents a valors de 'R' molt baixos. Aquí doncs l'experiència de l'analista hi juga un paper molt important.

8. Normativa

En l'àmbit espanyol la normativa més recent que fixa els requisits tècnics essencials, així com les mesures de seguretat que cal seguir en el disseny, construcció, proves, instal·lacions, utilització, manteniment i revisions periòdiques de les plantes de GNL, és la normativa UNE 60210:2015. Aquesta està destinada a instal·lacions amb dipòsits i equips criogènics amb un volum conjunt superior a 1 m³ i inferior o igual a 1.500 m³, amb una pressió màxima de servei superior a 1 bar. [AENOR, 2011]

Per a la realització i l'aplicació de la normativa UNE 60210:2015 cal tenir en compte també d'altres normatives que tracten temes concrets relacionats amb el GNL.

- UNE 60312:2015: Estacions de regulació per canalitzacions de distribució de combustibles gasosos amb pressió d'entrada no superior a 16 bars.
- UNE 60620-5:2005: Instal·lacions receptores de gas natural subministrades a pressions superiors a 5 bars. (Part 5. Grups de regulació).
- UNE 60670-3:2014: Instal·lacions receptores de gas subministrades a una pressió màxima d'operació (MOP, de les sigles en anglès de *Maxim Operation Pressure*), inferior o igual a 5 bars. (Part 3. Canonades, elements, accessoris i les seves unions).
- UNE-EN 1160:1997: Instal·lacions i equipament per GNL. Característiques generals del GNL.
- UNE-EN 13645:2003: Instal·lacions i equipament per GNL. Disseny d'instal·lacions terrestres amb capacitats d'emmagatzematge compreses entre 5 i 200 t.
- UNE-EN 60079-10:2016: Material elèctric per atmosferes de gas explosives. (Part 10. Classificació d'emplaçaments perillosos).

Altres reglaments d'aplicació, que tot i que no són explícitament per una planta de GNL, per la naturalesa d'aquest també cal tenir en compte, són: [SEDIGAS, 2015]

- RD 119/2005: Mesures de control dels riscos inherents als accidents greus en els quals intervinguin substàncies perilloses.
- RD 393/2007: Normativa bàsica d'autoprotecció dels centres, establiments i dependències dedicats a activitats que puguin originar situacions d'emergència.

- RD 2060/2008: Reglamento d'equips a pressió i les seves instruccions tècniques complementàries. Cal tenir en compte que en el cas d'aquest Reial Decret, l'apartat referent a les distàncies de seguretat no té validesa, ja que no inclou el metà, i per tant cal seguir les directrius de la normativa UNE 60210.
- RD 842/2002: Prescripcions particulars per les instal·lacions elèctriques de locals amb risc d'incendi i explosió.

A més a més, en funció de la comunitat autònoma en la qual es realitzi o operi la planta de GNL, és possible que en la fase de projecte i/o construcció s'apliquin disposicions o normes complementàries. Aquestes solen ser de caràcter mediambiental, estar relacionades amb permisos municipals de llicències d'obres i referents a seguretat i salut.

Per la quantitat d'informació present en les diverses normatives, s'adjunta als annexos la normativa UNE 60210:2011, la qual inclou la resta de normatives UNE esmentades anteriorment. Així mateix, també s'inclou la revisió de la UNE 60210:2015, la qual engloba les lleugeres modificacions que pateix la norma respecte a la versió del 2011, així com els diferents RD que s'han de contemplar en l'aplicació de la norma.

9. Cronograma

En aquest apartat s'ha realitzat una planificació de les diferents accions que s'han dut a terme durant el projecte, com la recerca bibliogràfica, l'entrenament amb l'eina de simulació FLACS, així com la simulació en si i el temps dedicat a la memòria escrita. Per tal de fer-ho, s'utilitza un diagrama de Gantt.

Primerament, abans de començar amb la realització del diagrama, es comptabilitzen les hores invertides en la realització de les diferents fases, ja que amb aquestes dades no només es tindrà una visió més completa de la planificació, sinó que també seran útils per a elaborar els costos del projecte més endavant.

A la taula següent s'han repartit les hores destinades a cada part del treball, tant a la part de simulació com a la de realització de la memòria. Dins de la part de simulació s'han tingut en compte tant l'entrenament previ necessari amb l'eina de simulació FLACS, com els experiments realitzats pròpiament i el seu processat. Pel que fa a les hores de la realització de la memòria, s'han tingut en compte tant la redacció com la recerca bibliogràfica i d'informació, a més a més del temps de correcció de la memòria. Aquestes dades es mostren a la taula 9.1 que està continuació.

Taula 9.1: Distribució de la dedicació d'hores al projecte.

| | Tasca | Hores invertides (h) |
|---------------------|--------------------------------------|----------------------|
| Part experimental | Exercicis d'entrenament | 17 |
| | Realització de les simulacions | 20 |
| | Anàlisi de resultats | 10 |
| Realització memòria | Redacció de la memòria | 100 |
| | Recerca bibliogràfica i d'informació | 80 |
| | Correcció de la memòria | 15 |

Cal tenir en compte que, les simulacions amb FLACS han estat realitzades en setmanes molt concretes, mentre que la recerca bibliogràfica i la redacció de la memòria s'ha dut a terme al llarg de quasi tota la durada del projecte. A continuació es mostra el diagrama de Gantt d'aquest projecte (figura 9.1):

10. Dimensió econòmica

En aquest capítol es farà una anàlisi econòmica del projecte. Es veuran els diferents costos del projecte en qüestió subdividits en dos apartats principals.

El primer té en compte bàsicament costos de personal, mentre que el segon inclou els costos derivats de l'ús de software i equipaments de la universitat.

- **Costos de personal:**

En aquest apartat es comptabilitzen els costos derivats de la contractació d'una persona per a la realització del treball, així com de dues persones més, les quals faran la feina de correcció de la memòria final.

Per a la contractació de la persona que realitzarà el treball, s'assumeix un sou corresponent al d'un enginyer tècnic, pertanyent al grup 7 segons la Federació Empresarial de la Indústria Química Espanyola. A partir del salari anual mínim d'aquest grup, s'ha calculat el sou en €/h tenint en compte una jornada laboral de 8h diàries, 5 dies setmanals i 320 dies feiners anuals. Aquest càlcul ha acabat proporcionant un valor de 12 €/h.

Pel que fa a la contractació de les dues persones necessàries per a la correcció de la memòria, s'ha calculat 2,5 vegades al sou mínim pertanyent al grup 7. Això s'ha determinat degut a la gran experiència professional que requerirà la persona en qüestió. Aquest càlcul ha donat un valor de 30 €/h.

El desglossament econòmic es pot veure a la taula 10.1 que es mostra a continuació.

Taula 10.1: Costos de personal del projecte.

| Concepte | Quantitat (hores) | Salari (€/hora) | Cost (€) |
|------------------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| Recerca bibliogràfica | 80 | 12 | 960,00 |
| Experimentació | 37 | 12 | 444,00 |
| Anàlisi de resultats | 10 | 12 | 120,00 |
| Redacció de la memòria | 115 | 12 | 1.380,00 |
| Revisió de la memòria | 20 | 30 | 600,00 |
| Subtotal | | | 3.504,00 € |

- **Costos de software i equipament:**

L'ús del software FLACS, així com els equipaments informàtics de la universitat, tenen costos molt elevats que no poden ser imputats en la seva totalitat a aquest projecte. Per aquest motiu, per tal de calcular el cost real que ha suposat la realització d'aquest projecte, s'utilitzarà el cost resultant de tenir en compte l'amortització dels diferents elements utilitzats. Per a fer-ho, s'utilitzarà la següent equació 10.1:

$$\text{Cost amortització} = \frac{\text{Cost equip}}{\text{Vida útil}} \cdot \text{Temps utilització} \quad (\text{Equació 10.1})$$

Sent els diferents costos expressats en € i el temps d'utilització i vida útil en anys.

El temps d'amortització utilitzat correspon als 4 mesos que ha durat la realització d'aquest projecte, és a dir, 1/3 d'any. En el cas del software FLACS, no només s'ha utilitzat durant 1/3 de l'any, sinó que ha estat utilitzat per 5 alumnes de la universitat. El cost imputable és només el proporcional a 1/15 part. A la següent taula 10.2 es pot observar els diferents costos de software i equipament.

Taula 10.2: Costos de software i equipament.

| Equip | Quantitat | Preu (€/unitat) | Vida útil (anys) | Cost |
|-----------------|-----------|-----------------|------------------|-----------------|
| Software FLACS | 1 | 20.000 | 3 | 444,44 € |
| Ordinador | 2 | 750 | 5 | 100,00 € |
| Subtotal | | | | 544,44 € |

S'ha decidit no contemplar la despesa associada a l'electricitat que consumeixen els ordinadors, així com la gastada pel departament de la universitat en general, ja que no pot ser 100% imputable a el projecte en qüestió i el seu valor és negligible.

- **Cost final del projecte**

Un cop calculades totes les despeses individualment, cal sumar-les en un sol pressupost final, obtenint el cost total del projecte. Es pot veure aquesta suma de costos a la següent taula 10.3.

Taula 10.3: Cost total del projecte.

| Concepte | Cost |
|-----------------------|-------------------|
| Personal | 3.504,00 € |
| Software i equipament | 544,44 € |
| Total | 4.048,44 € |

Finalment, el cost total del projecte ha estat de poc més de 4.000€.



11. Impacte mediambiental

En aquest apartat s'analitzarà l'impacte ambiental que aquest projecte, tot i ser eminentment teòric, causa al medi circumdant. Cal tenir en compte que l'anàlisi d'impacte ambiental només es realitzarà sobre la fase d'estudi i simulació d'instal·lacions i vaixells de GNL, però no es tindrà en compte l'impacte ambiental que la pròpia utilització del GNL té en el medi ambient.

La funció d'aquest estudi d'impacte ambiental és la de detectar i analitzar els diferents efectes, siguin positius o negatius, que té aquest projecte sobre el seu entorn. El fet d'identificar-los ens permet minimitzar, compensar o eliminar els impactes negatius que, siguin pocs o molts, tot projecte té associat, així com maximitzar a la vegada els efectes positius que aquest projecte pugui comportar.

Primerament, cal identificar els diferents aspectes mediambientals. Aquests es defineixen com a elements de les activitats, productes o serveis d'una organització que poden interactuar amb el medi ambient. [Carretero, 2007] En el cas del projecte que ens ocupa, els aspectes mediambientals són els següents:

- Residus: urbans o assimilables a urbans, perillosos i inerts.
- Contaminació acústica: soroll i vibracions.
- Consum de recursos: aigua, electricitat i combustibles.

Per tal d'identificar els impactes associats als diferents aspectes presentats, s'utilitzarà una matriu d'impacte mediambiental. En aquesta, els aspectes mediambientals es troben per files, mentre que els factors mediambientals a les columnes. Per determinar l'impacte ambiental que l'activitat d'aquest projecte provoca sobre els diferents medis, s'analitzen les situacions en les quals aquests es trobaven abans de la realització del projecte i es comparen amb la situació actual. Un cop realitzat, es valorarà si aquest canvi és positiu o negatiu.

Per a determinar l'impacte generat sobre el medi, s'utilitzarà un codi de colors a la matriu d'impacte ambiental per tal d'aconseguir un impacte més ràpid i visual: **Positiu** i **Negatiu**. En el cas que l'impacte sobre el medi sigui nul, aquesta es deixarà en blanc. S'han afegit aspectes mediambientals que tot i no ser gaire rellevants per aquest projecte, caldria tenir en compte en una anàlisi d'impacte ambiental general. Es pot observar aquests aspectes a la següent taula 11.1.

Taula 11.1: Matriu d'impacte ambiental.

| Planta a escala laboratori | Medi abiòtic | | | Medi biòtic | Factors socioeconòmics i culturals | | | | |
|------------------------------------|--------------|-------|-----|---------------|------------------------------------|---------|-----------------|-----------|-------------------|
| | Aire | Aigua | Sòl | Flora i fauna | Territori | Cultura | Infraestructura | Protecció | Economia-Població |
| Emissions i abocaments | | | | | | | | | |
| Contaminació acústica i vibracions | | | | | | | | | |
| Consum d'energia | | | | | | | | | |
| Generació d'olors | | | | | | | | | |
| Cost de funcionament | | | | | | | | | |

Com que la realització d'aquest projecte és eminentment teòrica, no hi ha un impacte negatiu pel que fa a emissions i abocaments de productes derivats de manera directa d'aquesta activitat. No obstant això, el fet d'utilitzar un software de simulació energèticament demandant com és el FLACS, té associat un consum d'energia que alhora té associat un impacte negatiu en la qualitat de l'aire (suposem que l'energia no és 100% neta i renovable). Així mateix, el projecte tampoc té associat cap tipus de contaminació acústica o d'olors.

Econòmicament, el projecte tindrà un impacte positiu. La informació d'aquest projecte, juntament amb la d'altres que el complementin, servirà perquè en el futur existeixi una millor infraestructura portuària, més eficient i segura. Aquest fet tindrà un impacte en un augment de llocs de treball, degut a la necessitat de personal per implementar les mesures corresponents, així com una menor pèrdua de recursos gràcies a la reducció d'accidents.

Finalment, la realització d'aquest projecte aporta uns coneixements científics i d'experiència en l'àmbit de la seguretat portuària. Aquest fet és beneficiós per a la societat, ja que permet que aquesta avanci en el seu coneixement i pugui minimitzar el risc en tot tipus d'accions que envoltin l'ús del GNL, fet del qual se'n beneficia tota la humanitat.

Conclusions

Aquest treball ha demostrat la importància de l'anàlisi de risc de les noves infraestructures portuàries, com les FSRU, donat el seu curt temps de vida i la falta d'una bona base de registres històrics per aquestes unitats en concret.

Les dades de freqüència i probabilitat relatives a aquestes instal·lacions ha permès determinar que el risc associat a aquestes infraestructures és inferior a 10^{-6} vegades/any, el que suposa un risc tolerable en principi per la societat. A més a més, els escenaris amb mortalitats més elevades tenen freqüències menors a 10^{-7} vegades/any, fet que encara reforça més l'acceptació d'aquest risc.

Pel que fa a l'anàlisi de la sobrepressió produïda a partir de l'explosió d'un núvol de GNL, s'han estudiat dos casos. El primer, un cas d'exemple que permet verificar la validesa del software FLACS respecte els mètodes tradicionals, mentre que el segon intenta replicar el màxim possible una situació de risc real. Per fer-ho, s'han utilitzat tres mètodes: TNT equivalent, multi-energia i FLACS.

S'ha comprovat que el mètode de multi-energia, el mètode fins ara més àmpliament utilitzat per predir la sobrepressió en explosions de gas, concorda amb els resultats que retorna FLACS en el cas d'exemple estudiat. Per contra, el mètode del TNT equivalent proporciona valors de sobrepressió molt més elevats que els altres dos mètodes.

Quan s'analitza l'escenari portuari dissenyat, els valors de sobrepressió que FLACS dona són incoherents. Aquest fet no es deu a una mala definició de les condicions de l'escenari, per lo que el problema s'ha determinat que està en el disseny de l'estructura. No obstant això, al haver comprovat que els valors de FLACS concorden amb els del mètode multi-energia, es poden considerar aquests com a correctes. Es determina que una explosió en una unitat FSRU amb amarratge directe a port (el més perillós de tots), amb les condicions ambientals i estequiomètriques més perilloses possibles, no tindria efectes mortals a terra ferma.

Finalment, i tot i que s'ha determinat que no hi haurien víctimes mortals en el cas estudiat, es pot concloure que una millor opció és la de situar les unitats FSRU en un amarratge tipus illa i amb els vaixells FSRU i LNGC situats en paral·lel. Aquesta situació, tot i donar altres complicacions de manteniment o costos afegits, permet augmentar la distància respecte d'altres persones alienes al procés de càrrega i descàrrega, així com reduir la possibilitat d'efecte dominó.

Agraïments

En primer lloc, cal donar les gràcies al CERTEC de la UPC, per donar-me la possibilitat de realitzar aquest projecte amb ells.

Voldria agrair a la meva directora de TFM, la Dra. Elsa Pastor Ferrer, i al meu codirector, el Dr. Joaquim Casal Fàbrega, pel seu interès i dedicació mostrat durant la realització del present projecte, sempre trobant un lloc per les consultes a les seves atapeïdes agendes. També m'agradaria agrair a en Christian Mata el seu suport durant l'ús de FLACS, sempre disposat a donar un cop de mà.

Finalment, també donar-los les gràcies a tota la meva família i amics pel seu suport durant aquests mesos de treball, especialment als meus pares, l'Andrés Arriola i la Núria Simón.

Moltes gràcies a tots.



Bibliografia

- ABS Group (American Bureau of Shipping). (2014). *Bunkering of Liquefied Natural Gas-fueled Marine Vessels in North America*. 8-12, 75-78.
- AENOR. (2011). *Plantas satélite de gas natural licuado (GNL)*.
- API. (2008). *API 581 Risk Based Inspection Technology*.
- Bonilla, J.M., Belmonte, P. & Marín, J.A. (2012). *Analysis of the explosion of a liquefied-natural-gas road-tanker*. Seguridad y Medio Ambiente. Fundación MAPFRE. Year 32 N127.
- Carretero, A. (2007). *Aspectos ambientales. Identificación y evaluación*. Madrid: AENOR.
- Casal, J. (2008). *Evaluation of the effects and consequences of major accidents in industrial plants*. Vol. 8. Amsterdam: Elsevier, 125-132, 250-253.
- CNGVA (Canadian Natural Gas Vehicle Alliance). (2014). *Liquefied Natural Gas: A Marine Fuel for Canada's West Coast*. 26-31.
- Cox, W. & Lees, F.P. (1990). *Classification of Hazardous Locations*. IChemE.
- EMSA (European Maritime Safety Agency). (2013). *Study on Standard and Rules for Bunkering of Gas-Fuelled Ships*.
- Envocare. (2013). *Liquefied Petroleum Gas (LPG), Liquefied Natural Gas (LNG) and Compressed Natural Gas (CNG)*. [http://www.envocare.co.uk/lpg_lng_cng.htm]. Consultada el dia: 10/03/17.
- Gexcon. (2015). *FLACS v10.4 User's Manual*.
- GNL global. (2015). *FSRU, la alternativa más rápida y barata para la importación de GNL*. [<http://www.gnlglobal.com/noticias/fsru-la-alternativa-mas-rapida-y-barata-para-la-importacion-de-gnl/>]. Consultada el dia: 18/03/17.
- Harsema-Mensonides, A. (2013). *LNG FSRU Technology. LNG FS(R)U Arrangements Around The World*. LNG Malasya Forum, Kuala Lumpur, 21st March 2013.
- Hjertager, B.H. (1982). *Simulation of transient compressible turbulent reactive flows*. Combustion Technology. Vol. 24. 159-170.

Hymes, I. (1983). *The Physiological and Pathological Effects of Thermal Radiation*. U.K. Atomic Energy Authority. SRD, Warrington. SRD R 275.

Launder, B.E. & Spalding, D.P. (1974). *The numerical computation of turbulent flows*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. Vol. 3. 269-289.

Mannan, S. (2012). *Lees' loss prevention in the process industries*. Fourth Edition. Elsevier Butterworth Heinemann, Amsterdam, The Netherlands.

Marsh (2012). *The 100 largest losses 1972–2009 – Large property damage losses in the hydrocarbon industry*, 22nd ed. Marsh Global Energy Risk Engineering, London, UK.

Parihar, A., Vergara, C. and Clutter, J. (2011). *Methodology for consequence analysis of LNG releases at deep water port facilities*. Elsevier, Safety Science, 49(5), 686-694.

Pietersen, C.M. (1990). *Loss Prevent. Proc.*, 10. 136.

Pitblado, R.M., Baik, J., Hughes, G.J. & Ferro, C. (2004). *Consequence of LNG Marine Incidents*. CCPS Conference, Orlando, 29th June - 1st July 2004.

Ramos, M.A., Droguett, E.L., Martins, M.R. & Souza, H.P. (2011). *Quantitative risk analysis and comparison for on shore and off shore LNG terminals: The port of Suapo - Brazil Case*. OMAE2011-50268. International Conference on Ocean, Off-Shore and Arctic Engineering, 19-24th June.

SEDIGAS. (2015). *Especificaciones técnicas de SEDIGAS para las actividades de Técnico de Plantas de Satélite de GNL*. Unidad 2 - Reglamentación y normativa.

UnionGas. (2017). *Chemical Composition of Natural Gas - Union Gas*. [<https://www.uniongas.com/about-us/about-natural-gas/chemical-composition-of-natural-gas>] Consultada el día: 24/05/17.

Vianello, C. & Maschio, G. (2014). *Risk Analysis of LNG Terminal: Case Study*. Chemical Engineering Transactions. Vol. 36. 277-282.

Woodward, J. & Pitblado, R. (2010). *LNG risk based safety. Modeling and Consequence Analysis*. 1st ed. Oxford: Wiley-Blackwell. 32-35.

Zalosh, R. (2008). *Explosion venting data and modelin resear chproject*. The Fire Protection Research Station. Quincy, MA.