#### POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Energetica

#### Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare

Tesi di Laurea Magistrale

# Sensori fire&gas su una piattaforma oil&gas: dall'analisi di rischio alla simulazione fluidodinamica



Relatori Candidato

Prof. Andrea Carpignano

Dott.ssa Claudia Vivalda

Prof.ssa Raffaella Gerboni

Claudia Iurato

Dicembre 2018

Alla mia famiglia che mi ha sempre supportato

#### **ABSTRACT**

Il rilascio di idrocarburi è una delle maggiori sorgenti di rischio sulle piattaforme offshore, pertanto un aspetto di fondamentale importanza, sin dalla fase di design dell'impianto, è quello di predisporre un sistema di monitoraggio fire&gas affidabile. La sua funzione principale è quella di rilevare efficacemente l'accumulo di gas pericolosi, prima che questo raggiunga una specifica concentrazione e dimensione, e di avviare adeguate procedure di emergenza per prevenire incidenti catastrofici legati alla presenza di gas.

A partire dall'analisi degli incidenti avvenuti in passato nel contesto offshore è nata l'esigenza di garantire una percentuale di copertura maggiore da parte del sistema di rilevazione fire&gas. Il presente lavoro di tesi mira a definire una metodologia finalizzata a migliorare la rilevazione di gas derivante da rilasci accidentali di idrocarburi sulle piattaforme offshore e rappresenta uno studio di fattibilità della metodologia individuata. Tenendo conto del fatto che sia per ragioni economiche che per indisponibilità di spazio utile non è consigliato sovradimensionare il numero di sensori in piattaforma, dunque risulta necessario trovare un ottimo tra il numero di sensori e il rispetto dei requisiti minimi di sicurezza. Ciò può essere ottenuto sviluppando strumenti che accoppiano modelli di fluidodinamica computazionale (CFD) e tecniche di ottimizzazione matematica.

Dopo una analisi bibliografica dei lavori presenti in letteratura circa l'ottimizzazione della posizione della sensoristica antincendio è stata scelta una formulazione di programmazione lineare stocastica mista a numeri interi (MILP) che individua come posizione ottimale per la disposizione dei sensori quella per cui si ottiene il valore minimo di rischio derivante dal rilascio di gas da tutti gli scenari incidentali possibili.

Il lavoro si compone di tre diverse fasi, nella prima parte dello studio è stata svolta una analisi di tipo probabilistico per creare un set di scenari incidentali completo ed esaustivo, in cui si tiene conto di tutte le variabili stocastiche che entrano in gioco quando si verifica un rilascio accidentale di gas, ad esempio la posizione della rottura, le condizioni di processo, la composizione del gas, la geometria circostante e le condizioni meteorologiche, tutti fattori che influenzano le prestazioni del sistema di rilevamento. Individuando i potenziali scenari di rilascio, si ottiene sia una informazione riguardo il valore di frequenza da inserire nel modello di ottimizzazione, sia il set di dati di input necessari per la successiva analisi.

Il passo successivo è stato quello di condurre le simulazioni di dispersione di inquinante sulla piattaforma, al fine di valutare per ciascuno scenario il volume di inquinante rilasciato e le zone interessate dal rilascio per identificare le potenziali posizioni in cui installare i sensori. Sono stati sfruttati i modelli della fluidodinamica computazionale, perchè permettono di trattare geometrie complesse, come nel caso in esame, e forniscono risultati più accurati rispetto ai più convenzionali modelli parametrici. È stato utilizzato un approccio multi-step, il quale prevede la separazione della fase di rilascio da quella di dispersione, ciò permette di ridurre il costo computazionale delle simulazioni e di ottenere un maggiore grado di dettaglio nella trattazione del fenomeno fisico.

Infine è stata applicata la formulazione di ottimizzazione proposta ed è stata calcolata la soluzione in funzione del numero massimo di sensori ammissibili, al fine di valutare sia il layout di sensori sulla geometria della piattaforma sia il conseguente livello di rischio.

Il progetto è stato sviluppato presso il laboratorio SEADOG (Safety and Environmental Analysis Division for Oil&gas) del Politecnico di Torino, finanziato dal Ministero dello Sviluppo Economico.

#### **ABSTRACT**

Hydrocarbon releases are one of the major sources of risk on offshore platforms, therefore an aspect of fundamental importance, since the design phase of the plant, is to provide a reliable fire&gas monitoring system. Its main function is to effectively detect the accumulation of dangerous gases, before it reaches a specific concentration and size, and to initiate appropriate emergency procedures to prevent catastrophic accidents related to the presence of gas.

Starting from the analysis of the accidents that have occurred in the past, the need to guarantee a higher percentage of coverage by the Fire & Gas detection system has arisen. The aim of this work is to define a methodology to improve the gas detection from accidental hydrocarbon releases on offshore platforms and represents a feasibility study of the identified methodology. Taking into account the fact that both for economic reasons and for unavailability of space it is not recommended to oversize the number of sensors on the platform, therefore it is necessary to find an optimum between the number of sensors and compliance with the minimum safety requirements. This can be achieved by developing tools that combine computational fluid dynamics (CFD) and mathematical optimization techniques.

After a bibliographic review of the works about the optimization of the of the fire&gas sensors position, a stochastic mixed-integers linear programming formula (MILP) has been chosen, which identifies as the optimal position of the sensors the one for which the minimum risk value associated to gas releases across all possible release scenarios is obtained.

The work consists of three sections, in the first part of the study a probabilistic analysis was carried out to create a complete and exhaustive set of accident scenarios, which takes into account all the stochastic variables that affect an accidental gas release, such as leak position, process conditions, gas composition, the geometry and meteorological conditions, all these factors influence the detection system performance. By identifying potential release scenarios, an information about the frequency of occurrance for each realease scenario is obtained and they represent the set of input data for the next analysis.

The next step was to conduct gas dispersion simulations on the platform, in order to evaluate for each scenario the volume of gas released and the areas affected by the release in order to identify the potential positions in which sensors could be installed. Computational fluid dynamics models have been used, because these allow studying complex geometries and providing more realistic results compared to the more conventional parametric models. A multi-step approach has been used, which consists in the separation of the release phase from the dispersion, this allows to reduce the computational cost of the simulations and to obtain a higher degree of detail in the analysis of the physical phenomenon.

Finally, the proposed optimization formulation was implemented and the solution was calculated according to the maximum number of sensors allowed, in order to evaluate both the sensor layout on the platform geometry and the consequent level of risk.

The project was developed in the SEADOG laboratory (Safety and Environmental Analysis Division for Oil&Gas) of the Politecnico di Torino, funded by Italian Minister of Economic Development.

#### INDICE

ABSTRACT	4
ABSTRACT	5
INDICE	6
ACRONIMI	9
INTRODUZIONE	10
CAPITOLO 1 – Quadro di riferimento	13
1.1 Piattaforme Offshore in Italia	13
1.2 Quadro normativo	15
1.3 Contesto progetto SEADOG	18
1.4 Analisi di rischio	20
1.4.1 Struttura dell'analisi di rischio	20
1.4.2 Sostanze coinvolte	23
1.5 Sistema di rilevamento gas	26
1.5.1 Tipologie di sensori	27
1.5.2 Stato dell'arte dei sistemi di rilevamento di gas	29
CAPITOLO 2 – Obiettivi e approccio metodologico	31
2.1 Premessa	31
2.2 Obiettivi della tesi	32
2.3 Metodologia proposta	33
2.4 Descrizione generale del caso studio	37
CAPITOLO 3 – Frequenza di accadimento dei possibili scenari di rilascio	40
3.1 Premessa	40
3.2 Scenari di rilascio	43
3.3 Evento iniziatore	44
3.4 Composizione del gas	44
3.5 Punto di rilascio	45
3.6 Pressione di rilascio	55
3.7 Diametro di rottura	55
3.8 Direzione di rilascio	56
3.9 Direzione e intensità del vento	57
3.10 Temperatura ambiente	61

3.11 Risultati relativi alla generazione degli scenari di rilascio	63
CAPITOLO 4 – Stima delle conseguenze degli scenari di rilascio	65
4.1 Simulazione CFD	65
4.1.1 Source-box	66
4.1.2 Coupling	69
4.2 Approccio modellistico utilizzato per il caso studio	71
4.2.1 Impostazioni preliminari	71
4.3 Geometria	72
4.4 Mesh	74
4.4.1 Grid Independence	75
Conclusioni Grid Independence	79
4.5 Setup	79
4.5.1 Boundary Conditions	80
4.6 Solution	81
4.6.1 Time-Step	82
Time-step independence	83
4.7 Caso studio	84
4.7.1 Scenario 1	85
CASO STAZIONARIO	85
CASO TRANSITORIO	87
4.7.2 Scenario 2	89
CASO STAZIONARIO	89
CASO TRANSITORIO	91
4.7.3 Scenario 3	92
CASO STAZIONARIO	92
CASO TRANSITORIO	93
4.7.4 Comparazione degli scenari	95
CAPITOLO 5 – Modello di ottimizzazione della rete di sensori	99
5.1 Formulazione teorica del problema	99
5.2 Implementazione numerica	101
5.2.1 Definizione dei parametri da inserire nel modello	102
5.2.2 Frequenza di accadimento dei singoli scenari	102
5.2.3 Coefficiente di danno	103

5.3 Risultati	109
CAPITOLO 6 – Conclusioni e sviluppi futuri	113
APPENDICE I	116
APPENDICE II	123
ALLEGATO I	128
ALLEGATO II	132
INDICE DELLE FIGURE	134
INDICE DELLE TABELLE	137
BIBLIOGRAFIA	138

#### **ACRONIMI**

BLEVE Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion

CFD Computational Fluid Dynamics

*DNV* Det Norske Veritas

Emegency Shutdown System

HSE Health and Safety Executive

IDLH Immediately Dangerous to Life or Health

*IOGP* International Association of Oil & Gas Producers

LC50 Lethal Concentration

*LFL* Lower Flammability Limit

PSA Petroleum Safety Authority Norway

UFL Upper Flammability Limit

UVCE Unconfined Vapor Cloud Explosion

#### INTRODUZIONE

Negli ultimi anni le FER (fonti energetiche rinnovabili) stanno diventando sempre più efficienti e competitive, grazie alle strategie adottate nel mondo a valle del Protocollo di Kyoto. In Europa con la Direttiva 2009/29/CE è entrato in vigore il cosiddetto pacchetto "Europa 2020", il quale prevede che i Paesi dell'UE raggiungano, nel periodo che intercorre tra il 2013 e il 2020, una produzione di energia da fonti rinnovabili pari al 20% della produzione totale. Nonostante ciò, una transizione globale realizzabile ed economicamente sostenibile è lungi dall'essere attuata a causa dei bassi prezzi del petrolio e dall'elevata inerzia del settore energetico. Gli alti costi di produzione e l'intermittenza delle risorse energetiche rinnovabili fanno si che il petrolio e il gas sono ancora oggi fondamentali nella produzione mondiale di energia, e sono destinati ancora ad esserlo nel prossimo futuro.

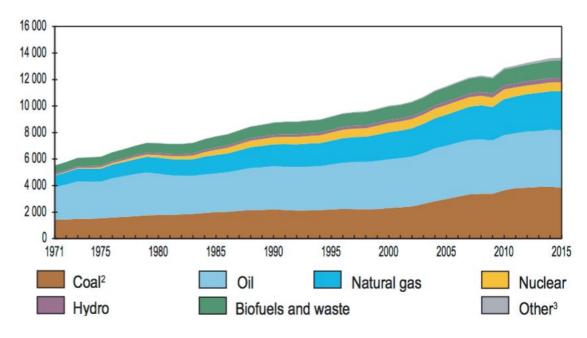


Figura 1 - Consumo di energia primaria mondiale per tipologia di vettore energetico [1]

Il crescente consumo di energia primaria a livello mondiale nel corso degli ultimi anni ha portato alla necessità di incrementare lo sfruttamento delle risorse fossili naturali, come gas naturale e petrolio, attraverso l'esplorazione di nuovi giacimenti sia a terra che in mare, resa possibile grazie allo sviluppo di nuove tecnologie estrattive. Il mercato delle installazioni Oil&Gas sia onshore che in particolare offshore è in continuo aumento e a seguito dell'evoluzione tecnologica, finalizzata ad ottimizzare i processi di estrazione e produzione di idrocarburi, tali impianti risultano essere sempre più complessi.

Le installazioni di interesse nel presente elaborato sono quelle finalizzate all'estrazione e produzione di idrocarburi, cioè quelle facenti parte della fase "upstream" nel ciclo produttivo del petrolio. Sono caratterizzate da impianti parecchio complessi, in quanto ospitano numerose unità di processo collegate tra loro, e poiché le sostanze trattate hanno particolari caratteristiche di infiammabilità e tossicità richiedono sistemi altrettanto complessi di controllo e di protezione per

prevenire l'occorrenza di eventi incidentali. Le piattaforme offshore rappresentano un ambiente molto particolare per il lavoratore, caratterizzato da fonti di emissione di sostanze pericolose situate molto vicino al luogo di lavoro. La geometria parecchio congestionata e la conformazione delle piattaforme influiscono notevolmente sulla capacità di dispersione degli inquinanti, inoltre, essendo collocate in mare aperto, sono soggette a condizioni di intensità e direzione del vento molto variabili. È necessario già in fase di progettazione cercare di prevenire e mitigare gli eventuali incidenti che possono verificarsi a seguito della dispersione di sostanze pericolose, al fine di assicurare un livello di sicurezza per le persone e per l'ambiente adeguato. La necessità di garantire un'adeguata protezione in termini di sicurezza è un aspetto cruciale nel settore industriale ed in particolare nel campo dell'Oil&Gas.

Il presente elaborato rientra nell'ambito dell'analisi del rischio applicata ad impianti Oil&Gas offshore, in particolare si vuole proporre una metodologia finalizzata a migliorare l'efficienza del sistema di rilevamento gas. Questo può essere ottenuto sviluppando strumenti che accoppiano modelli di fluidodinamica computazionale (CFD) e tecniche di ottimizzazione matematica, questi strumenti consentono una analisi molto più realistica, a condizione che siano in seguito validati. Il presente lavoro di tesi mira dunque a definire una metodologia finalizzata a migliorare la rilevazione di gas derivante da rilasci accidentali di idrocarburi sulle piattaforme offshore e rappresenta uno studio di fattibilità della metodologia individuata.

Il progetto è stato svolto all'interno del laboratorio SEADOG del Politecnico di Torino, ed è stato finanziato dal MISE, Ministero dello Sviluppo Economico.

Di seguito si riporta una breve descrizione della struttura dell'elaborato.

Il primo capitolo riguarda il quadro di riferimento del lavoro svolto e fornisce una introduzione generale ai temi trattati. Sono presentati: il quadro normativo di riferimento in materia di sicurezza offshore, i concetti base relativi all'analisi di rischio contestualizzata all'ambiente offshore ed infine un approfondimento sul sistema di rilevamento di gas pericolosi, che costituisce una barriera di sicurezza fondamentale.

Nel secondo capitolo sono descritti gli obiettivi del lavoro di ricerca svolto e una descrizione dell'approccio seguito per il raggiungimento di tali obiettivi. L'obiettivo è quello di proporre una metodologia per ottenere una rete ottimizzata di sensori fire&gas su una piattaforma oil&gas, e consiste di tre diversi step, descritti nei successivi tre capitoli.

Il terzo capitolo suggerisce un metodo per generare un set di scenari di potenziale rilascio accidentale di gas pericoloso, sono descritti i vari parametri di interesse e come questi sono stati accoppiati tra loro. I risultati ottenuti in questo capitolo forniscono una informazione sulla

frequenza di accadimento di ciascuno scenario, che sarà inserita nel modello di ottimizzazione proposto nel capitolo 5, e i dati di input per le simulazioni CFD descritte nel capitolo 4.

Nel quarto capitolo è descritto l'approccio a due step utilizzato per le simulazioni, utilizzando il modello di source-box che prevede la separazione della fase di rilascio da quella di dispersione. Sono state effettuate le simulazioni della fase di dispersione in condizioni transitorie per tre diversi scenari di potenziale rilascio individuati nel capitolo 3 e sono riportati i risultati ottenuti. In particolare dalle simulazioni si ottengono i punti potenziali in cui possono essere posizionati i sensori e una informazione circa le conseguenze di ciascuno scenario.

Nel quinto capitolo è descritta la funzione obiettivo, basata sul concetto di rischio, utilizzata nel modello di ottimizzazione. Tale modello è stato applicato al caso studio in esame e sono riportati i risultati.

Infine, nel sesto capitolo viene data una conclusione generale del lavoro e i possibili sviluppi futuri.

#### CAPITOLO 1 – Quadro di riferimento

#### 1.1 Piattaforme Offshore in Italia

Italia la maggiore produzione di gas naturale deriva dalle concessioni ubicate in mare, come si può vedere in Figura 2. Nel 2017 si è registrata una produzione di gas naturale pari a 5,66 miliardi di Sm3, con un decremento del 6,05 % rispetto alla produzione 2016 (6,02 miliardi di Sm3), di cui la quota derivante dalle operazioni in mare ricopre il 66% della produzione totale[2]. La produzione di olio contribuisce a circa il 7% del fabbisogno energetico nazionale, mentre quella di gas a circa il 10%.

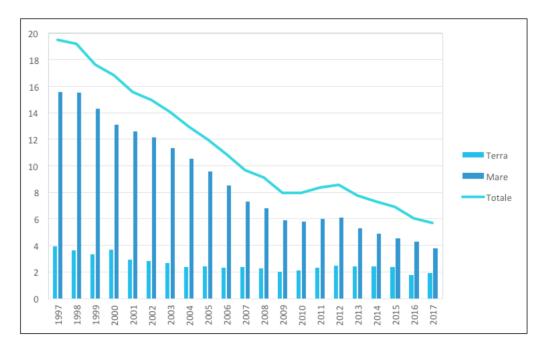


Figura 2 - Produzione di gas (miliardi di Sm3). Serie storica 1997 – 2017 [2]

Come si può facilmente vedere dal sito del MISE [3] in Italia sono presenti 139 piattaforme petrolifere, di cui 130 sono operative mentre le rimanenti 9 sono inattive. Quelle attive sono suddivise in:

- 120 sono piattaforme di produzione, di cui 12 sono teste di pozzo sottomarine e 108 con struttura emersa;
- 10 di supporto alla produzione (Compressione e raccordo).

In APPENDICE I è presentato un approfondimento relativo agli aspetti strutturali delle piattaforme offshore.

La maggioranza delle installazioni sono situate nell'alto Adriatico (circa il 90%), Figura 3, mentre la restante parte si trovano per lo più nel Mar Ionio e Mediterraneo, Figura 4.

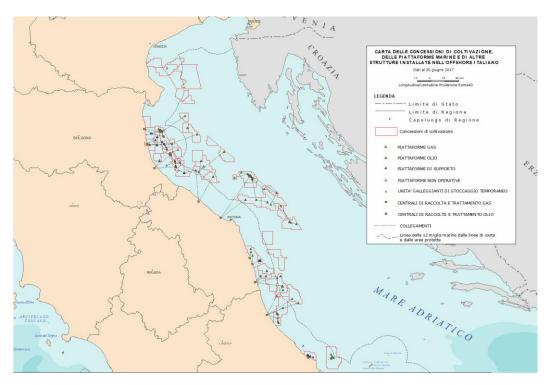


Figura 3 - Cartografia alto Adriatico [3]

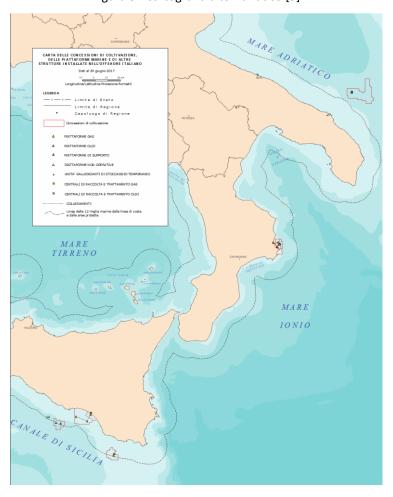


Figura 4 - Cartografia Mare Ionio e Canale di Sicilia [3]

#### 1.2 Quadro normativo

Il rilascio di idrocarburi rappresenta una delle maggiori sorgenti di rischio sulle piattaforme offshore finalizzate all'estrazione e alla produzione del petrolio [4].

Quando occorre un evento non desiderato, come il rilascio di idrocarburi in atmosfera, il suo evolvere in incidente rilevante può essere prevenuto mediante un adeguato sistema di prevenzione e protezione.

La definizione di **incidente rilevante**, o "major accident", secondo la normativa vigente è la seguente "un evento quale un'emissione, un incendio o un'esplosione di grande entità, dovuto a sviluppi incontrollati che si verifichino durante l'attività di uno stabilimento soggetto al presente decreto e che dia luogo a un pericolo grave, immediato o differito, per la salute umana o l'ambiente, all'interno o all'esterno dello stabilimento, e in cui intervengano una o più sostanze pericolose" [5].

In passato il settore oil&gas offshore è stato teatro di numerosi e significativi incidenti industriali, tra i più recenti vanno ricordati l'incidente della Piper Alpha avvenuto il 6 Luglio 1988 nel Mar del Nord e quello della Deepwater Horizon del 20 Aprile 2010 nel Golfo del Messico, Figura 5.



Figura 5 - Sversamento di idrocarburi nel Golfo del Messico, incidente Deepwater Horizon

Per le piattaforme Oil&Gas offshore presenti nel mar Adriatico le statistiche riguardanti infortuni e incidenti sono tendenti allo zero [4]. Nel mar del Nord l'ultimo incidente rilevante risale a circa 30 anni fa sulla piattaforma Piper Alpha, è importante notare come nei 10 anni precedenti ci sia stato un numero maggiore di incidenti rilevanti nonostante un livello di attività inferiore [5].

Tali eventi hanno generato una crescente sensibilità dell'opinione pubblica alle tematiche della sicurezza offshore, con un conseguente adeguamento della normativa al fine di minimizzare l'occorrenza dei cosiddetti "major accident". Sono state, infatti, emanate numerose leggi, [6], atte a:

- promuovere standard elevati in materia di salute, sicurezza e ambiente,
- rendere sistematica l'attuazione di misure per conformarsi ai requisiti e raggiungere gli obiettivi stabiliti nell'ambiente di lavoro e nella legislazione sulla sicurezza,
- sviluppare ulteriormente e migliorare il livello di salute, sicurezza e ambiente.

A seguito dell'incidente nel Golfo del Messico [8], la Commissione Europea ha avviato un'analisi approfondita delle attuali norme in vigore negli Stati membri e ha definito dei nuovi regolamenti con l'obiettivo di fissare elevati standard minimi di sicurezza per le attività offshore. È stata emanata la Direttiva 2013/30/UE, detta anche "Normativa Offshore", sulla sicurezza delle operazioni in mare nel settore idrocarburi, caratterizzata da un approccio basato sull'analisi di rischio ("risk-based permormance approach").

"L'obiettivo della direttiva è di ridurre per quanto possibile il verificarsi di incidenti gravi legati alle operazioni in mare nel settore degli idrocarburi e di limitarne le conseguenze, aumentando così la protezione dell'ambiente marino e delle economie costiere dall'inquinamento, fissando nel contempo le condizioni minime di sicurezza per la ricerca e lo sfruttamento in mare nel settore degli idrocarburi, limitando possibili interruzioni della produzione energetica interna dell'Unione e migliorando i meccanismi di risposta in caso di incidente" [7].

Il quadro normativo vigente fino al 2013 nei diversi stati dell'Unione Europea, in materia di sicurezza delle operazioni in mare per l'estrazione di idrocarburi, era discordante e scoordinato; mostrava talvolta carenze sia dal punto di vista della minimizzazione del rischio sia della tempestività ed efficacia degli interventi per la mitigazione delle conseguenze. Alcuni argomenti per cui era evidente la differenza tra le diverse normative sono ad esempio le disposizioni in materia di responsabilità, le norme di conformità delle attrezzature e lo scambio di informazioni, e riflettono la necessità di una omogeneizzazione.

A livello di Unione Europea le principali normative riguardanti le tematiche delle attività offshore erano:

- La norma 94/22/CE riguardante la regolamentazione delle condizioni di rilascio e di esercizio delle autorizzazioni alla prospezione, ricerca e coltivazione di idrocarburi. Gli stati membri devono accertare che la società autorizzata sia in grado di garantire in maniera costante operazioni sicure ed efficaci in tutte le condizioni prevedibili, fornendo riscontri sulla capacità di adottare tutte le misure idonee per coprire le responsabilità derivanti da incidenti gravi.
- La norma 2008/56/CE riguardante la tutela dell'ambiente marino. Tale norma stabilisce degli elementi base attraverso i quali gli Stati membri devono elaborare le proprie

- strategie per il conseguimento di un adeguato stato ecologico nelle acque marine di cui sono responsabili.
- La norma 2004/35/CE riguardante l'analisi della responsabilità ambientale. Chi svolge attività industriali che causano danni ambientali significativi a specie protette, ad habitat naturali o alle acque è direttamente responsabile della prevenzione e al risanamento dell'ambiente in caso di danni e dei relativi costi complessivi.

Regno Unito e Norvegia si distinguono in Europa, per l'accuratezza e consistenza delle disposizioni interne in tema di sicurezza per le installazioni offshore, sicuramente perché tali stati sono tra i principali attori del mercato offshore.

Il Regno Unito fa fronte all'H.S.E. (*Health and Safety Executive*), l'autorità pubblica britannica nell'ambito della salute e della sicurezza; mentre in Norvegia le norme in materia di salute e sicurezza per le persone e tutela dell'ambiente nell'industria petrolifera offshore sono regolamentate dall'autorità P.S.A. (*Petroleum Safety Authority Norway*).

In Italia la "Normativa Offshore" è stata recepita con il D.Lgs. 145/2015, mentre per il gli impianti onshore si fa riferimento alla "Direttiva Seveso". L'obiettivo del decreto è quello di "prevenire gli incidenti gravi nelle operazioni in mare nel settore idrocarburi e limitare le conseguenze di tali incidenti" [9]. Il principio cardine di tale Decreto si basa un concetto precauzionale, predilige cioè misure preventive a quelle mitigative.

#### 1.3 Contesto progetto SEADOG

La tesi è stata svolta presso il laboratorio **SEADOG** (*Safety and Enviromental Analysis Division for Oil and Gas*) facente parte del dipartimento Energia (**DENERG**) e rientra in un progetto frutto di una collaborazione tra il Politecnico di Torino e il Ministero dello Sviluppo Economico (**MISE**) – Direzione Generale per la Sicurezza - Ufficio Nazionale Minerario per gli Idrocarburi e le Georisorse (DGS-UNMIG).

Tra gli obiettivi principali del SEADOG-DENERG vi sono:

- lo sviluppo di strumenti innovativi per la simulazione di incidenti al fine di rendere la valutazione e gestione del rischio più accurata;
- Sviluppo di Linee Guida per la documentazione richiesta dal D.Lgs. 145/2015 (recepimento della Direttiva Europea 2013/30) in materia di gestione della sicurezza;
- Studio di modelli ibridi per la simulazione di rilasci di sostanze infiammabili al fine di ottimizzare la progettazione dei sistemi di sicurezza sulle piattaforme.

Il settore oil&gas presenta particolari caratteristiche e criticità in tema di valutazione del rischio sia per i lavoratori sia per l'ambiente. Il contesto offshore, in virtù della collocazione delle piattaforme e della densità delle apparecchiature presenti, fa sì che nello specifico esistono diverse normative e linee guida in continua evoluzione e differenziate in funzione dello scenario geografico [10]. Il rilascio di idrocarburi rappresenta una delle maggiori sorgenti di rischio sulle piattaforme offshore, pertanto un aspetto di fondamentale importanza, sin dalla fase di design dell'impianto, è quello di predisporre un sistema di monitoraggio fire&gas che sia affidabile. Il sistema di rilevamento di gas pericolosi rappresenta un livello fondamentale di protezione nell'industria di processo. La sua funzione principale è quella di rilevare efficacemente l'accumulo di gas pericolosi, prima che questo raggiunga una specifica concentrazione e dimensione, e di avviare adeguate procedure di emergenza per prevenire incidenti catastrofici legati alla presenza di gas [12].

Il presente lavoro di tesi si colloca dunque all'interno di un progetto più ampio che si propone di migliorare la conoscenza sulle possibili conseguenze legate ad eventi incidentali sugli impianti offshore per migliorare la progettazione sia dell'impianto che dei sistemi di sicurezza.

Il lavoro è stato svolto in parallelo ai colleghi Bono [17], Tortora [18], Rupolo [19], Carrozza [20] e Moscatello [21], ciascuno si è occupato dei diversi aspetti che rientrano tra gli obiettivi del progetto.

Per la progettazione di impianti offshore, recentemente, sono state introdotte analisi basate sull'utilizzo della fluidodinamica computazionale (CFD); il problema principale dell'utilizzo delle simulazioni CFD è che, data la notevole complessità geometrica delle piattaforme, i modelli di calcolo convenzionali risultano essere parecchio dispendiosi dal punto di vista computazionale e talvolta poco precisi, essendo indirizzati ad ambienti liberi. L'idea alla base del progetto sviluppato

presso il SEADOG è dunque quella di sviluppare un nuovo tipo di approccio al problema, tramite l'implementazione di un nuovo modello CFD definito "ibrido", per simulare gli eventi incidentali sulle piattaforme, come il rilascio accidentale di materiale tossico o infiammabile da apparecchiature in pressione che potrebbe essere alla base di incidenti rilevanti. Per modello "ibrido" si intende la separazione delle fasi di rilascio e dispersione. In particolare la fase di rilascio è caratterizzata da un getto supersonico e rappresenta la fase più dispendiosa dal punto di vista computazionale. La fase di rilascio è simulata all'interno di una scatola nera chiamata "source box" ed è analizzato il comportamento del getto supersonico di gas contro un ostacolo. Rupolo [19] si è occupato della modellizzazione di questa fase e della creazione di un catalogo che raccoglie le diverse grandezze di interesse, quali gradiente di velocità e concentrazione sulle facce della source box, in funzione di pressione e grandezza del foro. Gli output della prima fase di rilascio sono utilizzati come input per la seconda fase di dispersione caratterizzata dal moto di gas incomprimibile, con densità costante, e velocità paragonabile a quella del vento. In questo modo si riducono i tempi di calcolo mantenendo una elevata accuratezza dei risultati. Di questa seconda fase si è occupata Carrozza [20], definendo quali sono i parametri necessari e le impostazioni da utilizzare per condurre una simulazione di dispersione. Moscatello in [21] si è occupato della realizzazione di un metodo veloce ed efficace per estrapolare i dati di interesse dalla source-box, ovvero i profili di velocità e concentrazione dell'inquinante, ed utilizzarli come condizioni al contorno di ingresso nella piattaforma nelle simulazioni di dispersione. Questo procedimento è chiamato "coupling" tra le due fasi dell'approccio a due step e risulta necessario per evitare sovrastime o sottostime nella trattazione del fenomeno. Inoltre in [21] è stata effettuata una simulazione del rilascio di metano utilizzando l'approccio a singolo step, in modo da poter confrontare quale dei due approcci sia effettivamente più conveniente. L'approccio a singolo step ha presentato molti limiti, in termini di tempi di calcolo e di risorse richieste, dunque non sembra essere l'approccio migliore per la trattazione di un fenomeno così complesso.

Il modello ibrido di "sourcebox" può essere utilizzato per ricavare i parametri di interesse nella realizzazione di un modello in grado di fornire un posizionamento ottimizzato della sensoristica fire&gas su una piattaforma, inoltre tale modello risulta interessante perché ci si aspetta di ridurre i tempi di calcolo in vista di dover condurre le simulazioni di numerosi scenari incidentali. Il sistema di rilevamento di gas pericolosi deve garantire una risposta tempestiva quando si ha un rilascio indesiderato di gas al fine di prevenire l'evolversi di un incidente. Lo sviluppo di una metodologia per realizzare un sistema di rilevamento di gas rappresenta l'oggetto del presente elaborato.

Infine Bono [17] e Tortora [18] si sono occupati di diversi aspetti della progettazione di un laboratorio sperimentale per la simulazione di eventi incidentali e di dispersione di inquinanti in piattaforme Oil&Gas. Tale laboratorio sperimentale, una volta realizzato, sarà sede di validazione sia del modello riguardante la sensoristica fire&gas sia del modello ibrido di rilascio e dispersione di inquinante elaborato da Rupolo [19] e Carrozza [20].

#### 1.4 Analisi di rischio

La decisione di progettare e installare una rete di rilevamento di gas si basa sul rischio presente all'interno della struttura e sulla cultura locale, in quanto vi sono solo alcuni casi in cui il rilevamento del gas è richiesto dalla legge. A seconda della complessità e delle dimensioni dell'impianto, la valutazione di tali rischi può essere completata in modo qualitativo o mediante l'uso di strumenti di valutazione del rischio più rigidi.

L'analisi di rischio è uno strumento fondamentale sin dalla fase di progettazione e design delle piattaforme. Consiste in una metodologia sviluppata per rilevare i rischi associati ad eventuali scenari incidentali che potrebbero occorrere e le loro conseguenze su persone e ambiente. Con questo tipo di analisi vengono, infatti, individuati i punti "deboli" di un sistema complesso così da poter attuare delle strategie in grado di prevenire gli incidenti (ridurre la frequenza di accadimento) o, nel caso in cui questi avvengano, di mitigarne le conseguenze (ridurre il danno). Secondo la norma ISO 73/2002 [22] il rischio (R) è definito come il prodotto tra la probabilità di accadimento (f) di un evento e le sue conseguenze (d).

$$R\left[\frac{conseguenze}{anno}\right] = f\left[\frac{eventi}{anno}\right] \cdot d\left[\frac{conseguenze}{evento}\right]$$
 {1}

In ambito offshore i rischi principali sono:

- Rischio per le persone: riguarda le situazioni di pericolo a cui sono sottoposti gli operatori sulle piattaforme. Banalmente non è considerato il rischio per le persone circostanti, essendo gli impianti collocati in mare aperto.
- Rischio per l'ambiente: riguarda il possibile sversamento in atmosfera o nelle acque di produzione di sostanze inquinanti, derivanti dai processi o dagli oleodotti di estrazione stessi. I parametri di interesse sono la quantità di sostanza rilasciata e l'area contaminata, il danno è spesso definito come il tempo necessario all'ambiente per tornare alla condizione iniziale, cioè prima dello sversamento.
- Rischio economico: quest'ultimo è a sua volta suddiviso in rischio per i beni, rischio per la produzione e rischio per la reputazione della compagnia. Riguarda i danni ai macchinari e alle strutture, i danni derivanti dalla perdita di produzione e i danni legati alla perdita d'immagine della compagnia, quest'ultimo aspetto è legato al grado di divulgazione delle notizie, dai media locali a quelli internazionali.

#### 1.4.1 Struttura dell'analisi di rischio

Gli step principali di una analisi di rischio sono riportati in Figura 6, si ha una prima fase detta analisi di rischio *qualitativa*, in cui vengono raccolti tutti i dati dell'impianto, vengono identificati i pericoli e vengono selezionati gli eventi critici attraverso la matrice di rischio.

Nel caso di impianti a rischio di incidente rilevante (RIR) è necessario proseguire l'analisi, questa seconda fase è detta analisi di rischio *quantitativa* (QRA). Nella QRA gli eventi iniziatori vengono suddivisi in gruppi e viene definito l'evento iniziatore di riferimento (RIE), successivamente per ciascun RIE viene studiata la sequenza incidentale, con opportuni strumenti. Per definire il rischio occorre stimare la frequenza di accadimento per ciascuna sequenza incidentale mediante una analisi probabilistica e il danno mediante modelli che permettono di simulare l'incidente.

A valle si ha una quantificazione del rischio, nel caso in cui sia accettabile l'analisi giunge al termine, in caso contrario è necessario predisporre misure di prevenzione e/o mitigazione e svolgere nuovamente l'analisi completa.

L'identificazione dei pericoli è in grado di individuare tutte le anomalie/deviazioni che possono avvenire nel sistema a causa di fallimenti dei macchinari, errori umani, o eventi esterni. Il processo deve essere sistematico e completo, esistono diverse metodologie quali:

- Analisi storica,
- HAZID,
- HAZOP,
- FMECA.

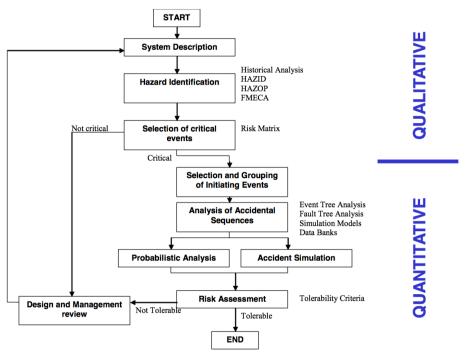
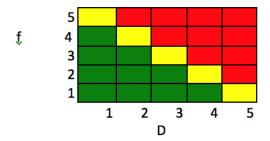


Figura 6 - Step analisi di rischio [11]

Alla fine di questo processo si ottiene una lista di eventi, attraverso la matrice di rischio si valuta il rischio a partire da indici qualitativi di frequenza e danno, Figura 7.



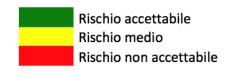


Figura 7 - Matrice di rischio

Si identificano tre zone nella matrice:

- Zona di rischio accettabile (verde): in cui le misure di prevenzione e mitigazione adottate durante la fase di design sono sufficienti.
- Zona ALARP (As Low As Reasonably Practicable) (giallo): è consigliabile svolgere la QRA per migliorare le safetyguards adottate.
- Zona si rischio inaccettabile (rosso): è obbligatorio svolgere la QRA per migliorare i sistemi di sicurezza dell'impianto.

Dunque gli eventi iniziatori che ricadono nella zona critica vengono raggruppati in base ad esempio alla sostanza coinvolta, alla stessa zona dell'impianto, ai sistemi di protezione coinvolti durante l'incidente. Per ciascun gruppo viene identificato l'evento di riferimenti per cui verrà effettuata la QRA.

Il primo passo è quello di studiare tutte le possibili sequenze incidentali a partire da ogni evento iniziatore al fine di definirne la frequenza e il danno. Gli strumenti generalmente utilizzati sono l'albero degli eventi (ETA) e l'albero dei guasti (FTA). Attraverso questi ultimi viene stimata la frequenza o in alternativa sono utilizzati modelli dinamici come le simulazioni Monte Carlo.

Per la stima del danno si esegue invece l'analisi delle conseguenze. Si utilizzano modelli di simulazione per valutare la dimensione dei fenomeni e l'estensione dell'area di danno. I modelli che possono essere utilizzati sono: i modelli semplici tabulari (quick method), i modelli parametrici, i modelli di simulazione fluidodinamica (CFD) o i modelli sperimentali in scala.

Il danno causato da uno scenario di rilascio può variare quindi da inconseguente a disastroso; la gravità delle conseguenze dipende da diversi fattori:

- Dal materiale rilasciato e dalle sue condizioni fisiche durante il processo;
- Dalla portata di rilascio;
- Dalla vicinanza tra il punto di rilascio e il personale e le sorgenti di innesco;

- Dall'abilità del personale a riconoscere una perdita, attraverso l'osservazione diretta o gli strumenti di misura;
- Dall'abilità ad isolare il processo o la sorgente di rilascio;
- Dalle condizioni atmosferiche.

Infine, nota la frequenza e il danno, è possibile quantificare il rischio e predisporre le misure di sicurezza adeguate. Il fine ultimo della valutazione del rischio è ovviamente la prevenzione di quest'ultimo, questo è possibile mettendo in pratica una serie di procedure operative, azioni, protocolli o di sistemi di protezione che fungono da barriera protettiva in grado di evitare o mitigare le conseguenze di eventi incidentali.

#### 1.4.2 Sostanze coinvolte

Come detto in precedenza, un aspetto fondamentale nell'analisi di rischio è definire dunque le sostanze coinvolte in una sequenza incidentale, le specie gassose con cui tipicamente si può entrare in contatto su una piattaforma oil&gas sono [10]:

- Idrocarburi (CH<sub>4</sub>): derivanti da possibili rotture di serbatoi o tubazioni di processo in pressione o atmosferici, sono gas estremamente infiammabili.
- Solfuro di idrogeno (H<sub>2</sub>S): è un gas estremamente tossico che si trova come contaminante nei gas ed olii prodotti, anche in piccole concentrazioni porta velocemente alla morte.
- Monossido di Carbonio (CO): è ottenuto dai processi di combustione per la generazione di elettricità e dalla combustione dei gas in eccesso, è una sostanza estremamente tossica.
- Biossido di Carbonio (CO<sub>2</sub>): è originato dai medesimi processi da cui si ottiene CO, ma è meno pericoloso di quest'ultimo in quanto sono necessarie elevate concentrazioni e spazi ristretti.

Le proprietà tossiche e infiammabili dei materiali oltre a costituire un pericolo per le persone e l'ambiente, devono essere considerate nel valutare la tipologia e disposizione dei rivelatori di gas.

Un gas si dice **infiammabile** se ha la capacità di sostenere una reazione chimica di combustione. Affinché si abbia la combustione e quindi un incendio, devono verificarsi contemporaneamente tre fattori, Figura 8: presenza di una sorgente di innesco, presenza di un comburente, solitamente ossigeno, e combustibile in forma gassosa in concentrazione entro certi limiti, detti limiti di infiammabilità.



Figura 8 - Triangolo degli incendi [14]

#### I limiti di infiammabilità sono:

- L.F.L. (lower flammability limit) cioè il limite inferiore di infiammabilità, è la minima concentrazione volumetrica di vapore nella miscela al di sotto della quale non si ha incendio, anche in presenza di innesco, per carenza di combustibile (miscela povera);
- U.F.L. (upper flammability limit) cioè il limite superiore di infiammabilità, è la massima concentrazione volumetrica di vapore nella miscela al di sopra della quale non si ha incendio, anche in presenza di innesco, per eccesso di combustibile (miscela ricca), Figura 9.

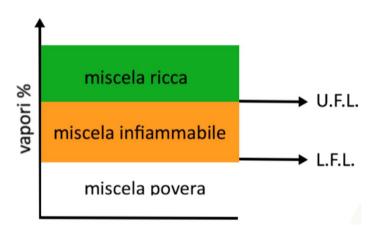


Figura 9 - Limiti di infiammabilità

Il limite inferiore di infiammabilità è comunemente utilizzato come unità di misura nel sistema di rilevazione antincendio, in quanto si vuole individuare un rilascio di gas indesiderato prima che questo rientri nei limiti di infiammabilità. È pratica comune assegnare il valore limite per gli allarmi antincendio su una frazione di LFL.

Nel caso in cui si verifichi un rilascio di fluido infiammabile e non si riesca a fermare la sequenza incidentale, l'evento può evolvere secondo diversi scenari, quelli che produco maggiore danno sono incendi ed esplosione. È dunque importante effettuare l'analisi delle conseguenze delle diverse sequenze incidentali.

Le principali tipologie di incendio sono:

- Jet fire: consiste in una fiamma diffusiva risultante dall'innesco immediato di un getto turbolento di combustibile liquido o gassoso rilasciato in modo continuo. La conseguenza principale è di tipo termico: si ha il riscaldamento delle apparecchiature colpite dal getto e l'irraggiamento sull'ambiente circostante.
- Pool fire: è generato dall'innesco immediato di una pozza di liquido, si ha la formazione di una fiamma diffusiva sopra la superficie di un infiammabile liquido. La principale conseguenza è l'irraggiamento termico sull'ambiente circostante, i parametri che influenzano le dimensioni di un pool fire sono il diametro della pozza, la temperatura del fluido (che influenza la quantità di liquido che evapora e che quindi genera vapori) e il vento (che influenza la lunghezza e la direzione della fiamma).
- Flash fire: è generato dall'innesco ritardato di una nube di vapori infiammabili, il fenomeno è molto rapido ma non tale da generare una esplosione. La prima fase consiste nella propagazione di una fiamma premiscelata nella zona della nube con concentrazione entro i limiti di infiammabilità, cioè quella più esterna della nube, la seconda fase si ha quando la fiamma raggiunge la zona più interna della nube con concentrazione superiore al limite di infiammabilità e la fiamma si propaga in maniera diffusiva. Le conseguenze sono generalmente molto gravi principalmente legate al coinvolgimento delle persone e delle strutture nell'area interessata dalla fiamma e l'irraggiamento termico nell'ambiente circostante. Per valutare i danni da flash fire bisogna effettuare la simulazione preliminare della dispersione della nube di vapori.
- Fire ball: è generato dall'innesco immediato di una grande quantità di vapori infiammabili. È un incendio molto rapido a fiamma diffusiva e di forma sferica. Solitamente è generato dal collasso di apparecchiature contenenti gas liquefatto in pressione, a seguito della perdita di contenimento, il liquido non risulterà più in condizioni di equilibrio e si verifica il fenomeno di flashing rapido (evaporazione rapida), a questo punto si può avere o BLEVE (esplosione) o fireball (incendio). L'evaporazione veloce di una gran massa di liquido infiammabile genera una nube di vapori di cui inizialmente solo una piccola parte, sul bordo esterno, ha una concentrazione interna ai limiti di infiammabilità. La presenza di un innesco immediato provoca la formazione di una fiamma localizzata sulla superficie della nube. Poiché la nube di combustibile è interna alla fiamma, si stabilizza una fiamma diffusiva sulla superficie della nube stessa. Man mano che la combustione procede la nube di combustibile si riscalda e si consuma, cioè diminuisce la densità e per effetto della spinta di galleggiamento si muove verso l'alto. La conseguenza principale è l'elevato irraggiamento termico nell'ambiente circostante.

Le esplosioni sono definite come il rilascio di energia in un tempo sufficientemente breve da generare un'onda di pressione di entità finita che si allontana dalla sorgente e che può essere udita, possono essere di due tipi:

- BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor explosion), è una esplosione fisica, cioè nel meccanismo di rilascio di energia non è coinvolta alcuna reazione chimica. Può essere generata dall'espansione rapida di un gas o dall'espansione del vapore formato da una rapida transizione di fase.
- UVCE (Unconfined Vapour Cloud Explosion), è una esplosione chimica, cioè una esplosione che trae la sua energia da una reazione chimica di combustione (di un gas o una polvere).

Un gas si dice tossico se ha la capacità di causare un ampio range di danno per l'uomo, dalle irritazioni alle situazioni estreme in cui si ha la morte. L'unità di misura su cui sono settati gli allarmi relativi ai gas tossici è il ppm (parti per milione) in quanto già piccolissime concentrazioni di certe sostanze sono capaci di produrre effetti negativi sull'uomo. Un altro parametro importante è il tempo di esposizione, il quale è tenuto in considerazione nella definizione dei limiti di sicurezza che si riferiscono ai gas tossici. Risulta ovvio che una risposta veloce da parte dei rilevatori di gas fa sì che il periodo di esposizione diminuisca. Se la sostanza tossica è in fase di gas tende a disperdersi in atmosfera una volta rilasciata; nel caso di rilascio di liquido si forma una pozza, quest'ultima evaporando produce vapori tossici che si disperdono in atmosfera. I modelli di dispersione esaminano la dinamica della nube in atmosfera e valutano quale concentrazione si raggiunge durante la dispersione nelle aree circonstanti al punto di rilascio; l'obiettivo dei modelli è di individuare la distanza alla quale si raggiungono alcune specifiche soglie di concentrazione: l'IDLH (Immediately Dangerous to Life or Health) e la soglia di mortalità LC50 (caratterizzata da una letalità tale da uccidere il 50% della popolazione campione). Le aree con concentrazioni tra l'IDLH e LC50 sono soggette a danni irreversibili e anche letali.

#### 1.5 Sistema di rilevamento gas

Su una piattaforma oil&gas è un fatto ordinario entrare in contatto con sostanze pericolose sia per l'uomo sia per l'ambiente, essendo queste ultime alla base di tutti i processi che avvengono nell'impianto. Come evidenziato dalla normativa 2013 una piattaforma offshore deve dunque necessariamente avere degli altissimi standard di sicurezza. Per questo motivo è necessario svolgere l'analisi di rischio, studiando gli eventuali rilasci accidentali di fluidi pericolosi e con l'obiettivo di predisporre piani di contenimento dei danni e di mitigazione delle eventuali conseguenze. Un aspetto fondamentale per la sicurezza sulle piattaforme è l'adozione di un sistema di monitoraggio di gas pericolosi che sia veloce ed efficiente.

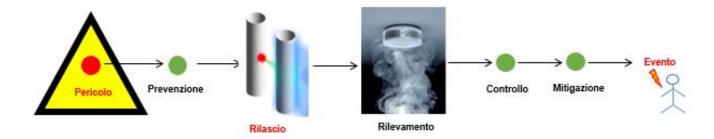


Figura 10 - Barriere di sicurezza

Il livello di sicurezza negli impianti oil&gas offshore è fortemente influenzato dalla precisione in cui vengono rilevati i rilasci di gas indesiderati [23]. Un sistema di rilevamento di gas deve essere in grado di fornire un "early warning" (allarme precoce) della presenza di un rilascio o di un accumulo di materiale infiammabile [24].

Le funzioni principali di un sistema di rilevamento di gas sono di individuare la presenza di sostanze pericolosa in quelle zone laddove non dovrebbe essere presente e di informare i sistemi di allarme e di sicurezza, che svolgono le loro specifiche funzioni per limitare le conseguenze del rilascio di gas.

Le azioni innescate dal sistema di rilevatori di gas possono essere sia manuali che automatiche, ad esempio:

- Evacuazione sicura dei locali;
- Appropriate misure d'emergenza antincendio;
- Rimozione del pericolo;
- Spegnimento del processo o dell'impianto (ESD, emergency shutdown system);
- Ventilazione.

Alcune importanti considerazioni sono la scelta della quantità e del posizionamento dei rilevatori di gas, entrambe sono influenzate da numerosi fattori, tra cui le proprietà del gas rilasciato, le condizioni dell'ambiente circostante, la geometria dell'ambiente e le norme e disposizioni delle autorità locali.

#### 1.5.1 Tipologie di sensori

Un sistema di rilevatori di gas è composto da diversi sensori che utilizzano differenti tecnologie per rilevare la presenza di gas tossici e infiammabili. Un sensore è composto da tre elementi: il sensore, un trasmettitore e una unità di controllo; il sensore converte la presenza di gas in un segnale elettrico misurabile, quest'ultimo è amplificato e inviato dal trasmettitore al modulo di controllo.

Esistono diverse tipologie di sensore, una prima distinzione riguarda l'area di copertura:

- Sensori puntuali;
- Sensori a percorso aperto.

Una seconda distinzione, invece, riguarda la tecnologia di rilevamento:

- Sensori catalitici;
- Sensori a infrarossi;
- Sensori elettrochimici;
- Sensori semiconduttori;
- Sensori a ultrasuoni.

I gas pericolosi si dividono in due categorie, come detto in precedenza, tossici e infiammabili. I sensori catalitici e quelli a infrarossi sono utilizzati per rilevare la presenza di gas infiammabili, mentre i sensori elettrochimici e semiconduttori sono indicati per i gas tossici. Essendo il metano il gas di interesse nel presente lavoro di tesi, ed in particolare le sue proprietà di infiammabilità, di seguito è riportata una descrizione delle due tecnologie di rilevazione relative ai gas infiammabili [23][25][24]. I rilevatori di gas infiammabile sono calibrati per attivare l'allarme ad una specifica frazione del limite inferiore di infiammabilità, solitamente il 10% di LFL è il massimo livello inferiore di allarme mentre il 40% di LFL è il massimo livello superiore di allarme per cui si ha l'auto shutdown dell'impianto [25], questa scelta dipende dal gas da rilevare, dalla tipologia di sensore installata e dalla gestione del sistema di rilevazione di gas.

#### 1.5.1.1 Sensori catalitici

I sensori catalitici sono sensori puntuali che basano il loro funzionamento sul fatto che un gas combustibile può essere ossidato per produrre calore. Il sensore è composto da un elemento attivo e da uno passivo, entrambi gli elementi sono protetti da un sinterizzato ignifugo e sono separati da una barriera termica. Un gas combustibile si ossida quando entra in contatto con la parte attiva del sensore ed è rilasciato calore. Questo induce una variazione di resistenza del filo conduttore, collegato all'elemento attivo, mentre l'elemento passivo mantiene la stessa resistenza poiché non ossida il gas. Il calore rilasciato è proporzionale alla differenza di resistenza e può essere calcolato con un ponte di Wheatstone collegato ai due elementi del sensore. Questa tipologia di sensore fornisce una risposta rapida e ha un basso costo unitario, ma, essendo disponibile soltanto come sensore puntuale, il suo posizionamento è critico, sono necessari sensori multipli per assicurare un rilevamento veloce e affidabile; inoltre il dispositivo può essere soggetto all'avvelenamento del catalizzatore e quindi fornire una misura non veritiera in assenza di una manutenzione regolare.

#### 1.5.1.2 Sensori a infrarossi

I sensori a infrarossi possono essere sia puntuali, cioè quando l'emettitore e il ricevitore sono posti ad una breve distanza, che a percorso aperto. Il principio di funzionamento si basa sul fatto che molti gas assorbono le radiazioni nel campo degli infrarossi.

Il sensore è composto da un emettitore di luce e da un ricevitore, sono misurate sia le lunghezze d'onda assorbite che quelle non assorbite. Quando è presente un gas tra il trasmettitore e il ricevitore si ha una variazione di intensità della luce generata dall'emettitore, misurando tale variazione è possibile identificare di quale gas si tratti e la sua concentrazione.

I vantaggi dell'uso di questi sensori sono: lunga durata, da 3 a 5 anni, lettura diretta della misura, basso livello di manutenzione richiesto; gli svantaggi maggiori riguardano la possibile interferenza tra i raggi d'azione dei diversi sensori e la possibile influenza dell'umidità e della polvere.

#### 1.5.2 Stato dell'arte dei sistemi di rilevamento di gas

Data l'importanza del sistema di rilevamento di gas, sono state fornite diverse linee guida generali per la progettazione dei sistemi di rilevamento dei gas dai vari enti regolatori [24][25][26][27].

Una volta stabilito, attraverso l'analisi di rischio, che è necessario installare un sistema di monitoraggio del gas e scelta la tipologia di sensore adatta, nelle moderne industrie di processo sono tipicamente adottati approcci qualitativi di posizionamento dei sensori, basati su regole empiriche e procedure prescrittive, questo a causa della generalità degli standard esistenti e delle incertezze insite nell'individuazione dei rilasci di gas. È importante sottolineare come le suddette linee guida sono utili per massimizzare il successo di rilevamento a seguito di un rilascio ma questo non è garantito, a seguito di tale osservazione si evince la necessità di andare oltre con l'obiettivo di sviluppare modelli ottimizzati per il posizionamento della sensoristica fire&gas in un contesto sensibile come le piattaforme offshore [12].

Le strategie di posizionamento dei sensori possono essere suddivise in cinque classi, ovvero:

- Monitoraggio delle sorgenti;
- Monitoraggio volumetrico;
- Monitoraggio dell'involucro;
- Monitoraggio del percorso e dei bersagli;
- Monitoraggio perimetrale.

Negli ultimi anni, per migliorare le prestazioni dei sistemi di rilevazione, sono stati introdotti i concetti di rischio e la modellizzazione della dispersione di gas basati sulla fluidodinamica computazionale (CFD) in alternativa ai convenzionali approcci qualitativi. In [28] è associata alle norme prescrittive una valutazione del rischio eseguita sulla base della copertura del rilevatore di gas e, se non viene raggiunta la soglia di rischio accettata, viene modificato il posizionamento del rilevatore di gas. In [29] è presentata una metodologia basata sul rischio per valutare la dimensione massima di una nube di gas che deve essere rilevata affinché l'impianto abbia un rischio tollerabile. Successivamente sono state sviluppate anche metodologie di posizionamento basate su concetti di ottimizzazione, ad esempio in [30] le posizioni dei sensori sono determinate tramite un algoritmo di programmazione dinamica iterativo che utilizza una misura di rischio come funzione obiettivo, in [31] l'algoritmo è basato sull'efficienza del posizionamento: è definita una matrice di rivelatori all'interno del volume di controllo e viene calcolato un valore di efficienza globale per ogni specifico rivelatore. In [32] è presentato un approccio basato sul calcolo CFD per stimare la dispersione di gas e quindi ottenere la posizione ottimale dei sensori di gas.

Più recentemente, in [33] è stata presentata una formulazione di programmazione lineare stocastica a numeri interi per ottimizzare il posizionamento dei rilevatori di gas, il lavoro mira a ridurre al minimo il tempo di rilevamento per un determinato set di scenari di rilascio in base a un vincolo di copertura, l'approccio seguito nel presente lavoro di ricerca si ispira a questa formulazione.

#### CAPITOLO 2 – Obiettivi e approccio metodologico

#### 2.1 Premessa

Anche se attualmente esistono diverse tecnologie di rilevamento efficaci per rilevare i rilasci accidentali di gas pericolosi, le effettive prestazioni operative dei sistemi di rilevamento di gas non soddisfano ancora i requisiti previsti. Dall'analisi del database dell'HSE sui rilasci di idrocarburi in ambiente offshore risulta che una percentuale significativa di emissioni di gas negli impianti offshore non vengono rilevate con successo dal sistema di rilevamento[13], questo è dovuto alla vasta gamma di incertezze che influenzano le prestazioni dei sistemi di rilevamento dei gas, come ad esempio la posizione della rottura, le condizioni di processo, la composizione del gas, la geometria circostante e le condizioni metereologiche. In Figura 11 sono riportati i dati relativi alle percentuali di rilasci di gas sulle piattaforme offshore che non sono state rilevate dal sistema di sensori fire&gas per il periodo 1992-2008.

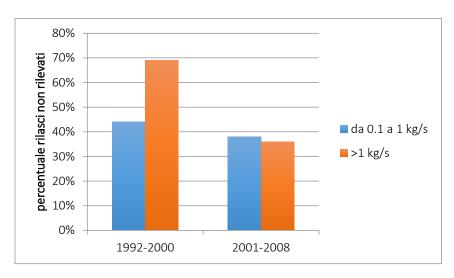


Figura 11 - Percentuale rilasci di idrocarburi non rilevate (rapporto dell'HSE [13])

Tuttavia, è difficile sia stimare le prestazioni e l'efficienza della rete di rivelatori sia identificare le misure appropriate per ottimizzare le prestazioni nel modo più conveniente. Ciò può essere migliorato sviluppando strumenti che accoppiano modelli di fluidodinamica computazionale (CFD) e tecniche di ottimizzazione matematica, questi strumenti consentono una analisi molto più realistica, a condizione che siano in seguito validati, cioè che sia verificata l'accuratezza del modello proposto per poter essere utilizzato come strumento per supportare decisioni. La simulazione del fenomeno di dispersione di un gas infiammabile fornisce una mappatura dei punti più probabili di accumulo a concentrazioni pericolose e quindi delle indicazioni circa gli effettivi punti potenziali per il posizionamento dei sensori. L'aumento del numero di rilevatori potrebbe migliorare il rilevamento del numero di perdite di gas ma ciò comporterebbe costi aggiuntivi e

potrebbe non assicurare una copertura maggiore degli effettivi rilasci se i sensori non sono posizionati in modo ottimale. Le tecniche di mappatura e modellazione CFD, combinate con la conoscenza dell'impianto e il suo funzionamento, possono fornire un mezzo per ottimizzare sia il numero che la posizione dei rivelatori di gas all'interno di una determinata area per ridurre il rischio di incendio ed esplosione a un livello specificato.

#### 2.2 Obiettivi della tesi

Il presente lavoro di tesi mira a definire una metodologia finalizzata a migliorare la rilevazione di gas derivante da rilasci accidentali di idrocarburi sulle piattaforme offshore e rappresenta uno studio di fattibilità della metodologia individuata. A partire dall'analisi degli incidenti avvenuti in passato nel contesto offshore è nata l'esigenza di garantire una percentuale di copertura maggiore da parte del sistema di rilevazione fire&gas e in tempi più brevi. Tenendo conto del fatto che sia per ragioni economiche che per indisponibilità di spazio utile non è consigliato sovradimensionare il numero di sensori in piattaforma, dunque risulta necessario trovare un ottimo tra il numero di sensori e il rispetto dei requisiti minimi di sicurezza.

Dopo una analisi bibliografica dei lavori presenti in letteratura circa l'ottimizzazione della posizione della sensoristica antincendio brevemente descritta nel paragrafo 1.5.2 Stato dell'arte dei sistemi di rilevamento di gas, è stata scelta una formulazione di programmazione lineare stocastica mista a numeri interi (MILP) che individua come posizione ottimale per la disposizione dei sensori quella per cui si ottiene il valore minimo di rischio derivante dal rilascio di gas da tutti gli scenari incidentali possibili, a differenza di quanto proposto in [33], dove la variabile da ottimizzare è il tempo di rilevamento essendo tutti gli scenari di rilascio considerati equiprobabili. Questa ipotesi non riflette il reale rischio derivante dai vari scenari di rilascio e potrebbe comportare che il sistema di sensori progettato non rispetti i requisiti minimi di sicurezza imposti.

Come detto in precedenza, il rischio è dato dal prodotto di due fattori, cioè la frequenza e il danno. Un primo punto importante è quello di suggerire un metodo stocastico per generare un set di scenari potenziali di rilascio che sia completo ed esaustivo al fine di coprire l'ampio range di incertezze che caratterizza l'incidente. Per ottenere un risultato rigoroso dal modello di ottimizzazione è necessario che il numero di scenari sia sufficientemente elevato da rappresentare l'intero spazio degli eventi di potenziale rilascio, una delle limitazioni dei lavori presenti in letteratura è quella di considerare un numero limitato di scenari incidentali, ad esempio solo quelli ad alto impatto, ma in realtà il rischio legato al rilascio di idrocarburi è affetto da molte incertezze legate alle condizioni di rilascio e condizioni metereologiche che devono essere tenute in considerazione per migliorare l'efficienza del sistema di rilevamento di gas. Individuando i potenziali scenari di rilascio di gas che possono verificarsi, si ottiene sia una informazione riguardo il valore di frequenza da inserire nella formulazione dell'ottimizzazione, sia il set di dati di input

necessari per la successiva analisi, necessaria per definire la stima delle conseguenze e quindi il valore del danno.

Per la stima del valore del danno per ciascuno scenario incidentale individuato ci si propone di sfruttare una modellizzazione rigorosa per la simulazione della dispersione di gas inquinante, sul software FLUENT ANSYS 18.2, utilizzando il modello ibrido di "source-box". Come accennato nel CAPITOLO 1, Tuttavia, è difficile sia stimare le prestazioni e l'efficienza della rete di rivelatori sia identificare le misure appropriate per ottimizzare le prestazioni nel modo più conveniente. Ciò può essere migliorato sviluppando strumenti che accoppiano modelli di fluidodinamica computazionale (CFD) e tecniche di ottimizzazione matematica, questi strumenti consentono una analisi molto più realistica, a condizione che siano in seguito validati, cioè che sia verificata l'accuratezza del modello proposto per poter essere utilizzato come strumento per supportare decisioni. La simulazione del fenomeno di dispersione di un gas infiammabile fornisce una mappatura dei punti più probabili di accumulo a concentrazioni pericolose e quindi delle indicazioni circa gli effettivi punti potenziali per il posizionamento dei sensori. L'aumento del numero di rilevatori potrebbe migliorare il rilevamento del numero di perdite di gas ma ciò comporterebbe costi aggiuntivi e potrebbe non assicurare una copertura maggiore degli effettivi rilasci se i sensori non sono posizionati in modo ottimale. Le tecniche di mappatura e modellazione CFD, combinate con la conoscenza dell'impianto e il suo funzionamento, possono fornire un mezzo per ottimizzare sia il numero che la posizione dei rivelatori di gas all'interno di una determinata area per ridurre il rischio di incendio ed esplosione a un livello specificato. Tale modello è stato studiato in lavori di ricerca precedenti svolti all'interno del laboratorio Seadog ed uno dei risultati è stato quello di raggiungere una maggiore accuratezza nel calcolo del volume di inquinante rilasciato e nella individuazione delle zone coinvolte dalla nube di metano riducendo il tempo computazionale rispetto alle tradizionali simulazioni CFD. Una della finalità del presente lavoro di tesi è quella di proporre una applicazione del modello ibrido di simulazione ad un problema reale, quale il posizionamento della sensoristica antincendio, e verificare che effettivamente questo comporti una riduzione del costo computazionale di simulazione senza compromettere la qualità dei risultati. Tale riduzione è necessaria per consentire la simulazione, durante la fase di progettazione di una piattaforma offshore, di un numero elevato di potenziali scenari incidentali in tempi accettabili, i cui risultati saranno utilizzati come dati di ingrasso al modello di ottimizzazione del posizionamento dei sensori.

#### 2.3 Metodologia proposta

In letteratura, come introdotto nel paragrafo 1.5.2 Stato dell'arte dei sistemi di rilevamento di gas, sono presenti diversi studi riguardanti i problemi di ottimizzazione per il posizionamento della sensoristica antincendio. Alcuni lavori, presi come riferimento, propongono una funzione obiettivo che mira a minimizzare il rischio legato ai diversi scenari incidentali simulati. In [12], per la scelta delle posizioni dei sensori da ottimizzare si utilizza un approccio di copertura volumetrica. Viene definita una griglia di sensori nello spazio, vengono effettuate le simulazioni di dispersione e per

ciascun punto di monitoraggio viene registrata l'evoluzione della nube e quindi della concentrazione di inquinante. Questo modello risulta dispendioso dal punto di vista computazionale poiché bisogna analizzare tutti i punti di monitoraggio e una volta svolta l'analisi attraverso il modello di ottimizzazione, se dovesse esserci uno scenario che non è rilevato da alcun sensore, bisognerebbe opportunamente riformulare la posizione dei punti di monitoraggio e ripetere la simulazione. In Figura 12 è riportato come esempio di come verrebbe applicato il metodo descritto, cioè di una griglia di sensori, al modello di piattaforma utilizzato nel presente elaborato.

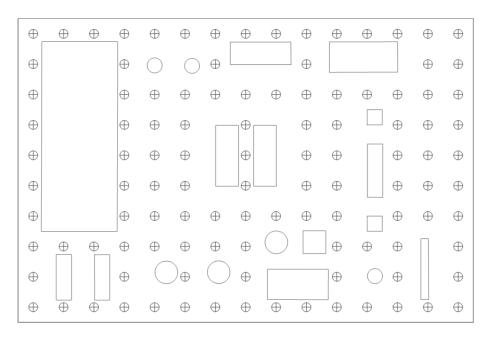


Figura 12 – Esempio griglia punti di monitoraggio prestabilita

Il metodo che si è scelto di utilizzare nel presente elaborato è quello di copertura degli scenari, cioè la possibilità di ottenere le potenziali posizioni dei sensori da ottimizzare senza fissarle a priori ma ricavandole dalle simulazioni di dispersione, ciò assicura il fatto che ciascuno scenario abbia almeno un punto di potenziale rilevamento da parte della rete di sensori e che, compatibilmente con il numero massimo di sensori consentiti, sia rilevato in un tempo sufficientemente breve tale da rispettare i requisiti minimi di sicurezza. In questa logica è necessario che gli scenari di potenziale rilascio da simulare siano rappresentativi dell'intero spazio degli eventi e la modellizzazione CFD permette di considerare i diversi fattori che influenzano la formazione di nubi dai rilasci e le interazioni tra tali parametri. In Figura 13 è rappresentato un esempio di punti potenziali per il posizionamento dei sensori che potrebbero essere ricavati dalle simulazioni di dispersione per il modello di piattaforma in esame e in Figura 14 è rappresentato qualitativamente un esempio di ciò che si potrebbe ottenere applicando un modello di ottimizzazione con il vincolo che il numero massimo di sensori consentito sia inferiore a quello di Figura 13. La distribuzione dei punti potenziali per il posizionamento dei sensori è spaziale, cioè è considerata anche la quota a cui possono essere collocati.

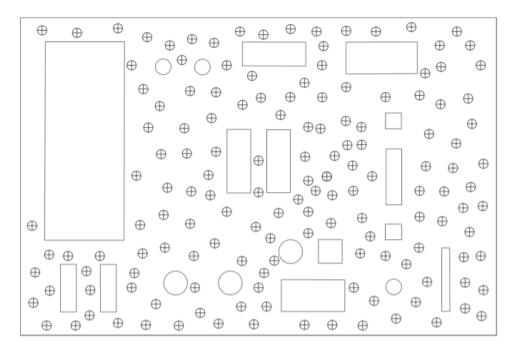


Figura 13 - Esempio punti potenziali per i sensori ricavati dalle simulazioni CFD

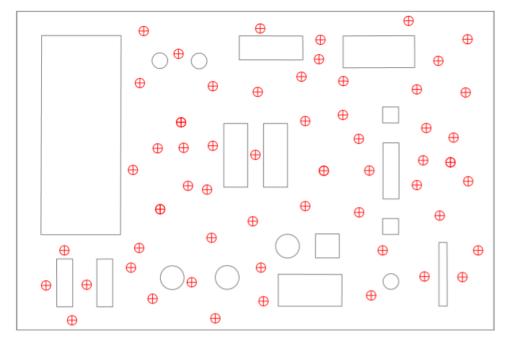


Figura 14 - Esempio rete ottimizzata di sensori

In Figura 15 è riportata una schematizzazione della metodologia proposta per il raggiungimento degli obiettivi.

# Generazione degli scenari di rilascio rappresentativi Evento iniziatore Composizione del gas Punto di rilascio Pressione di rilascio Diametro rottura Direzione rilascio Velocità del vento Direzione del vento



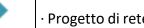
· Temperatura ambiente

### Simulazioni CFD di dispersione per ciascuno scenario selezionato per la modellizzazione

- · Modellizzazione delle simulazioni CFD in condizioni transitorie
- · Simulazione
- Determinazione delle possibili posizioni per i sensori derivanti dall'insieme degli scenari selezionati

## Posizionamento ottimale del rivelatore mediante l'approccio alla programmazione stocastica

- · Modellizzazione teorica del modello di ottimizzazione
- Definizione delle variabili di input al modello dalle simulazioni CFD e applicazione del modello





 $\cdot \ \mathsf{Progetto} \ \mathsf{di} \ \mathsf{rete} \ \mathsf{di} \ \mathsf{sensori} \ \mathsf{ottimizzato}$ 

Figura 15 - Struttura del lavoro

La costruzione delle condizioni iniziali degli scenari di rilascio inizia con l'identificazione degli eventi di rilascio del gas, integrando studi pubblicati in letteratura riguardanti la perdita di contenimento degli impianti di processo delle piattaforme O&G offshore e la revisione delle statistiche e rapporti di investigazione degli incidenti. Successivamente sono stati individuati i parametri minimi necessari per definire in maniera completa uno scenario di rilascio di gas ed è stato elaborato un programma di simulazione Monte Carlo sul software Matlab per combinare tra loro tali parametri al fine di ottenere un numero di scenari incidentali sufficientemente alto da tentare di coprire

l'intero spazio degli eventi. L'approccio seguito per la costruzione del set di scenari di rilascio è proposto nel CAPITOLO 3.

Come si è detto, l'individuazione degli scenari di rilascio ha un duplice scopo, cioè quello di definire la frequenza per cui può verificarsi un dato evento incidentale e quello di fornire i dati di input per le simulazioni, necessarie per la stima delle conseguenze.

Il CAPITOLO 4 riguarda gli aspetti teorici e l'applicazione del modello utilizzato per le simulazioni CFD relative alla dispersione di gas sulla piattaforma. È stato scelto di utilizzare il modello innovativo di "source-box", poiché questo consente una modellizzazione accurata del fenomeno in esame e riduce il costo computazionale della simulazione. Per l'implementazione del modello di ottimizzazione sono stati selezionati alcuni scenari di rilascio, tra quelli generati, e a partire da questi sono state condotte le simulazioni CFD al fine di definire il danno potenziale generato da ciascuno scenario.

Nel CAPITOLO 5 infine è presentato il modello teorico di ottimizzazione che si è scelto di utilizzare per lo scopo dell'elaborato e un esempio applicato al presente caso studio.

## 2.4 Descrizione generale del caso studio

Il metodo descritto è stato applicato al caso studio in esame, il quale prevede una geometria semplificata rappresentativa di un tipico deck di produzione di una piattaforma oil&gas offshore, dove sono presenti i sistemi di trattamento e separazione per olio, gas e acqua, i sistemi e le valvole di controllo e i generatori per la produzione di energia.

Le dimensioni della piattaforma sono state scelte facendo riferimento ad una piattaforma reale, di conseguenza gli ingombri e il posizionamento della componentistica sono stati scelti sempre in riferimento a tale piattaforma, così da rappresentare lo spazio congestionato tipico di una piattaforma.

In Figura 16 è raffigurato il layout di piattaforma utilizzato nel presente caso studio. Le piattaforme offshore sono composte da diversi piani chiamati "deck" (APPENDICE I), è stato scelto un tipico deck di produzione, la cui lunghezza è pari a 30 m, larghezza 20 m e altezza 5 m.

L'elemento separatore tra un deck e l'altro può essere o una struttura reticolare metallica (grided deck) o una pavimentazione solida (plated deck). Questo aspetto ha una grande influenza sulla dispersione dell'inquinante, nel primo caso la sostanza può attraversare i diversi piani, nel secondo rimane confinata tra due deck. Nel presente elaborato è stata ipotizzata una struttura di tipo plated, cioè a pavimentazione solida, si ha una totale separazione dei piani, ciò significa che nel caso di dispersione di gas, questo rimane confinato all'interno del deck. Questa configurazione rappresenta il caso più conservativo quando si tratta di dispersione di gas, poiché, a causa della geometria congestionata e della presenza di grossi ingombri sul deck, possono crearsi accumuli di gas e di conseguenza incendi e/o esplosioni.

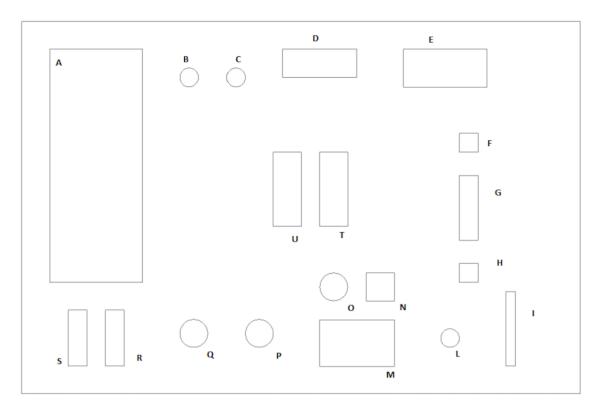


Figura 16 - Layout deck di produzione

Sulle piattaforme la geometria è parecchio complicata a causa della presenza di numerosi ostacoli, nel caso in esame è stata semplificata, mantenendo le apparecchiature principali del deck di produzione. In pianta, non sono raffigurate le tubazioni e le valvole, essendo i componenti più numerosi sulla piattaforma. In Tabella 1 è presentata la legenda della componentistica.

Α	SALA COMANDI	L	SEPARATORE DI GAS
В	SCRUBBER DEL COMPRESSORE DI ASPIRAZIONE	М	RIGENERATORE DI GLICOLE
С	SCRUBBER DEL COMPRESSORE DI SCARICO	N	POMPA GLICOLE
		О	SERBATOIO GLICOLE
D	TRATTAMENTO OLIO	Р	SERBATOIO DIESEL
Е	UNITÀ LACT (lease automatic custody transfer)	Q	SERBATORIO DIESEL
F	PILASTRO	R	GENERATORE DI POTENZA
G	SERBATOIO OLIO SECCO	S	GENERATORE DI POTENZA
Н	PILASTRO	Т	SEPARATORE
I	PIG TRAP	U	SEPARATORE

Tabella 1 - Legenda componenti

Il presente lavoro di ricerca rappresenta uno studio di fattibilità del metodo proposto per la realizzazione di una rete ottimizzata di sensori, integrando la fluidodinamica computazionale e un modello di ottimizzazione matematica basato sul rischio, dunque sono stati studiati, con la CFD (CAPITOLO 4), solamente tre dei mille scenari di rilascio accidentale di gas individuati nel CAPITOLO 3. Il modello di ottimizzazione proposto nel CAPITOLO 5 è stato implementato su un numero ridotto di scenari, per dare maggiore robustezza al metodo, in futuro, sarebbe bene estendere la sua applicazione ad un numero maggiore di scenari di rilascio.

I tre capitoli successivi rappresentano l'applicazione al caso studio della metodologia descritta nel precedente paragrafo.

# CAPITOLO 3 – Frequenza di accadimento dei possibili scenari di rilascio

#### 3.1 Premessa

Il punto di partenza per la generazione degli scenari di rilascio è stato un approfondimento riguardante le principali cause di rilascio di gas pericoloso sulle piattaforme offshore e la stima delle frequenze di rilascio da attribuire a ciascuno scenario.

Sin dagli anni '90 le autorità Inglesi e Norvegesi hanno elaborato linee guida per gli obblighi di segnalazione di informazioni relative a emissioni, scarichi e rischio di inquinamento per le attività offshore [34]. Le segnalazioni delle situazioni di pericolo e di incidente alle autorità di vigilanza devono includere situazioni in cui vi è il rischio che navi o oggetti alla deriva possano entrare in collisione con le strutture, incidenti di controllo del pozzo, esplosioni e incendi, principali scarichi accidentali di idrocarburi e prodotti chimici rilevanti per la sicurezza e l'ambiente di lavoro, scarichi accidentali di petrolio, fluido di perforazione e sostanze chimiche rilevanti per l'ambiente esterno, incidenti in cui l'uso di sorgenti radioattive è fuori controllo o si sono verificati scarichi acuti di sostanze radioattive [35].

Nonostante, la maggior parte delle industrie di processo sia generalmente riluttante a rivelare le cause degli incidenti e il numero di persone uccise o ferite [36], sul dominio pubblico sono presenti report e statistiche inerenti ai rilasci di idrocarburi sulle piattaforme offshore, si tratta di documenti elaborati dalle autorità e che riportano i dati in forma anonima. In particolare si fa riferimento alle statistiche pubblicate dalle autorità Inglesi (HSE – Health and Safety Executive) [37] e ai rapporti annuali, che rientrano nel progetto RNNP, presentati sul sito delle autorità Norvegesi (PSA – Petroleum Safety Autority) [38]. Il progetto "Trend Level Risk Project (RNNP)" è stato avviato nel 1999/2000 per sviluppare uno strumento che permetta di illustrare l'andamento del livello di rischio sulle piattaforme installate nel Mar del Nord. Inoltre, dovrebbe fornire una base per la definizione delle priorità di azione in materia di sicurezza e la definizione delle priorità delle attività di vigilanza del PSA. Il progetto è ormai un'attività annuale. Contribuiscono alla stesura di questo documento: le compagnie petrolifere, le autorità Norvegesi (PSA) e le autorità Inglesi (HSE).

Le perdite di idrocarburi possono essere suddivise in tre categorie: perdite di gas, perdite di olio o perdite multifase. I rilasci di gas hanno il maggior potenziale di causare danni a causa del rischio di esplosione dalla dispersione di nubi di gas. Nel progetto RNNP sono considerate tutte le perdite con portata pari o superiore a 0,1 kg/s, poiché pur essendo un valore modesto rappresenta una considerevole sorgente di rischio [39].

In Figura 17 è rappresentato un riassunto del numero di rilasci di idrocarburi con portata superiore a 0,1 kg/s in funzione dell'anno sulle piattaforme norvegesi del mare del Nord.

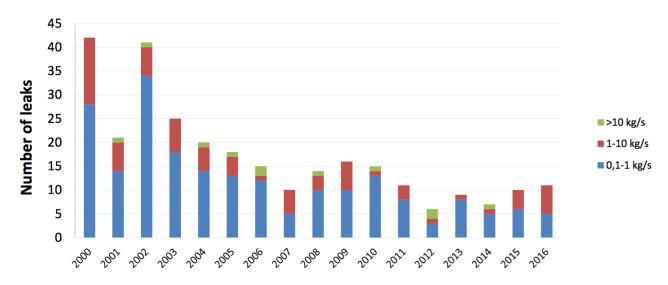


Figura 17 - Numero di rilasci di idrocarburi > 0,1 kg/s [38]

Numerosi studi sono stati volti alla ricerca e investigazione delle cause di rilascio di idrocarburi sulle piattaforme offshore al fine di migliorare e ottimizzare il sistema di prevenzione e protezione da incidenti rilevanti. In un articolo del 2006, basandosi sulla revisione delle statistiche [37], dei report di incidenti [38] e della letteratura riguardante la perdita di contenimento, gli scenari di rilascio sono divisi in sette principali categorie [44]:

- 1. Rilascio a causa di un errore operativo durante la normale produzione
  - a) Rilascio dovuto a malfunzionamento della / e valvola / e durante le operazioni manuali
  - b) Rilascio dovuto a malfunzionamento delle tubazioni temporanee
  - c) Rilascio causato dalla perdita di acqua nelle chiusure idrauliche nel sistema di scarico
- 2. Rilascio a causa di errori latenti introdotti durante la manutenzione
  - a) Rilascio dovuto al montaggio errato di flange o bulloni durante la manutenzione
  - b) Rilascio dovuto alla/e valvola/e in posizione errata dopo la manutenzione
  - c) Rilascio a causa di errata scelta o installazione del dispositivo di tenuta
- 3. Rilascio durante la manutenzione del sistema di idrocarburi (che richiede lo smontaggio)
  - a) Rilascio a causa di un errore prima o durante lo smontaggio del sistema di idrocarburi
  - b) Rilascio dovuto alla rottura del sistema di isolamento durante la manutenzione
- 4. Rilascio a causa di guasti tecnici / fisici
  - a) Rilascio dovuto alla degradazione della tenuta della valvola
  - b) Rilascio dovuto alla degradazione della guarnizione della flangia
  - c) Rilascio dovuto alla perdita di tensione dei bulloni
  - d) Rilascio dovuto alla degradazione dei tubi saldati
  - e) Rilascio dovuto a corrosione interna

- f) Rilascio dovuto a corrosione esterna
- g) Rilascio dovuto all'erosione
- 5. Rilascio a causa di variazioni dei parametri di processo
  - a) Rilascio dovuto a sovrapressione
  - b) Rilascio a causa di aumento di portata o troppo pieno
- Rilascio a causa di eventi esterni
   Rilascio causato da cedimenti strutturali del contenimento dovuti a carichi esterni che superano la resistenza del materiale. Due tipi di impatto esterno sono identificati come
  - a) oggetti cadenti

i più comuni:

- b) urti / collisioni
- 7. Rilascio a causa di errori di progettazione

La complessità delle piattaforme di produzione di petrolio e gas implica che ci sia un numero molto elevato di condizioni ed eventi che possono causare rilasci di idrocarburi. La categorizzazione degli scenari presentata non copre dettagliatamente tutte queste cause, tuttavia, è considerata come un insieme completo e rappresentativo tanto che è ripresa e utilizzata in altri studi [40][41][42], di conseguenza anche nel presente elaborato è considerata valida. Per valutare se l'elenco proposto sia esaustivo per la specifica piattaforma, gli scenari generici devono essere confrontati con analisi di rischio (ad es. Hazop / Hazid) eseguite per il caso in esame [44].

Gli studi più recenti hanno messo in luce come il clima lavorativo sia associato alle prestazioni di sicurezza sulle piattaforme. In termini di cause di rilascio, una grossa porzione di tali perdite è correlata alle attività di manutenzione e a interventi manuali sul sistema produttivo, in particolare le attività di preparazione alla manutenzione contribuiscono maggiormente ad aumentare il rischio di rilascio [4]. Queste conclusioni suggeriscono l'importanza di investigare fattori correlati all'organizzazione, progettazione e gestione dei lavori sulla piattaforma.

Un esempio di quanto detto si ha in Figura 18 dove le piattaforme del mar del Nord di competenza Inglese e Norvegese sono messe a confronto. Questo studio, sviluppato dalle Autorità, dimostra che gli incidenti legati al rilascio di idrocarburi sono considerevolmente più frequenti nell'area pertinente al NCS (Norvegian Continental Shelf) rispetto alla parte corrispondente del Regno Unito (UKCS United Kingdom Continental Shelf) ed in particolare quelli correlati a fattori umani. La Gran Bretagna ha lanciato una campagna già nel 2000 per ridurre il numero di questi eventi, il che potrebbe essere uno dei motivi per cui sono stati ottenuti risultati migliori rispetto alla Norvegia per le perdite di idrocarburi. La grande differenza tra la NCS e l'UKCS mostra che rimane un notevole potenziale di miglioramento nel settore offshore norvegese.

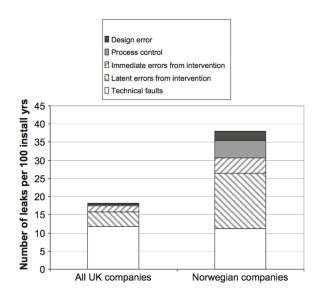


Figura 18 – Confronto tra le compagnie petrolifere Inglesi e Norvegesi [40]

Inoltre c'è spesso una forte convinzione tra i professionisti che la frequenza di rilascio di idrocarburi e l'età della piattaforma siano parametri correlati. L'età delle installazioni non mostra una correlazione rilevante con la frequenza delle perdite ma tutte le analisi indicano che le installazioni più vecchie hanno, significativamente, più perdite di quelle più recenti.

# 3.2 Scenari di rilascio

Uno scenario di rilascio è definito dal seguente set di parametri:

- Evento iniziatore,
- Composizione del gas,
- Punto di rilascio,
- Pressione di rilascio,
- Diametro rottura,
- Direzione rilascio,
- Velocità del vento,
- Direzione del vento,
- Temperatura ambiente.

Di seguito è presentata la metodologia e i criteri di scelta per generare un set di scenari di rilascio che sia completo ed esaustivo, al fine di rilevare i punti più sensibili sul layout della piattaforma e ottimizzare la disposizione in campo della sensoristica fire&gas.

#### 3.3 Evento iniziatore

L'evento iniziatore è definito come l'accadimento all'origine di una catena di eventi successivi che determinano nel loro complesso uno scenario di pericolo caratterizzato da una specifica distribuzione di conseguenze che identificano il danno a esso associato [43].

Per la definizione di uno scenario di rilascio è ritenuta valida la classificazione proposta da Sklet [44]:

- 1. Rilascio a causa di un errore operativo durante la normale produzione;
- 2. Rilascio a causa di errori latenti introdotti durante la manutenzione;
- 3. Rilascio durante la manutenzione del sistema di idrocarburi (che richiede lo smontaggio);
- 4. Rilascio a causa di guasti tecnici / fisici;
- 5. Rilascio a causa di variazioni dei parametri di processo;
- 6. Rilascio a causa di eventi esterni;
  - (a) oggetti cadenti,
  - (b) urti / collisioni,
- 7. Rilascio a causa di errori di progettazione.

La suddetta classificazione deriva da una analisi dei dati reali relativi ai rilasci sulle piattaforme offshore, questi ultimi sono alla base delle statistiche utilizzate per la definizione degli scenari incidentali [45][46].

## 3.4 Composizione del gas

Nell'industria di processo è di fondamentale importanza, in materia di sicurezza, conoscere la composizione del gas per svariate motivazioni. In primo luogo per valutare i potenziali rischi per le persone e fissare le soglie di sicurezza in funzione della pericolosità dell'inquinante (infiammabile, esplosivo e/o tossico), e in secondo luogo per la sicurezza delle apparecchiature di processo e dell'ambiente circostante che potrebbero essere danneggiati a seguito di un incendio o di una esplosione. È importante conoscere la composizione del gas rilasciato per la stima del conseguente impatto ambientale e del possibile danno economico per l'azienda, sia in termini di perdita di prodotto sia in termini di immagine pubblica. La valutazione del rischio è finalizzata a predisporre misure di prevenzione, protezione e mitigazione delle conseguenze, tra queste troviamo i rilevatori di gas; in commercio esistono svariate tipologie di sensori, conoscendo le proprietà chimico-fisiche del gas da rilevare è possibile scegliere la tecnologia più adatta.

Nel presente elaborato è fissata la sostanza rilasciata: Metano (CH<sub>4</sub>) in fase gassosa.

Tale scelta è motivata dal fatto che le piattaforme Italiane producono principalmente gas metano, si veda il paragrafo 1.1 Piattaforme Offshore in Italia.



Figura 19 - Pittogrammi di pericolo CH<sub>4</sub> [47]

In Figura 19 sono riportati i pittogrammi di pericolo relativi al metano in fase gas secondo la normativa [47], le relative indicazioni di pericolo sono le seguenti:

- H220: Gas altamente infiammabile;
- H280: Gas Compresso, può esplodere se riscaldato.

In Tabella 2 sono riportate le proprietà chimico-fisiche di interesse del metano. Le definizioni di LFL e UFL sono riportate al paragrafo 1.4.2 Sostanze coinvolte.

Temperatura di ebollizione	-161,4 °C
Punto critico	-82,6°C
LFL	5%(vol)
UFL	15%(vol)

Tabella 2 - Proprietà del metano

# 3.5 Punto di rilascio

Per la generazione dei diversi scenari, il componente da cui proviene il rilascio è scelto in maniera casuale con l'ausilio del metodo Monte Carlo. Tale metodo permette di simulare i diversi risultati che può avere un dato evento, tenendo conto della probabilità di accadimento di ciascuno di essi [48]. Il layout è definito a monte della simulazione Monte Carlo, una volta identificato il componente è noto il corrispondente punto di rilascio. La posizione della rottura è importante per valutare il volume occupato dell'inquinante durante la fase di rilascio e di dispersione e definire i punti più sensibili per la disposizione dei sensori.

Per la scelta casuale del componente attraverso la simulazione Monte Carlo, il termine probabilistico è stato ottenuto combinando opportunamente la frequenza di rilascio del singolo componente e il numero di componenti presente.

La frequenza di guasto per le apparecchiature di processo sulle piattaforme offshore è un dato difficile da reperire, questo perché ci sono poche fonti, che spesso sono incerte, e ogni compagnia petrolifera ha le proprie statistiche. Per anni le compagnie DNV e IOGP hanno valutato i dati presenti sul database HCRD (Hydrocarbon releases databases), che non è più consultabile, ma le stesse informazioni sono state trasferite e aggiornate sul sito dell'HSE [49] e hanno elaborato le generiche frequenze di rottura per le apparecchiature. Tali statistiche rappresentano la fonte più affidabile presente in letteratura e sono finalizzate ad essere una linea guida per le operazioni o per integrare le politiche locali da parte dei singoli membri.

Sui documenti utilizzati per la stima delle frequenze di rottura, DNV [45] e IOGP [46], i componenti sono raggruppati in 11 categorie a fronte delle 78 presenti sulle statistiche [49]:

- 1. Compressori
  - Centrifughi
  - Alternativi
- 2. Filtri
- 3. Flange
- 4. Scambiatori di calore (inclusi Coolers, Heaters e condensatori)
  - Raffreddati ad aria
  - Scambiatori a piatti
  - Scambiatori a mantello
  - Scambiatori a fascio tubiero
- 5. Pig traps
- 6. Tubazioni di processo
- 7. Pompe
  - centrifughe
  - alternative
- 8. Strumentazione
- 9. Valvole
  - manuali
  - attuate
- 10. Serbatoi di processo pressurizzati
- 11. Serbatoi di stoccaggio atmosferici

Per evitare che dati poco rilevanti, ai fini delle statistiche, influiscano negativamente sull'affidabilità dei risultati, le dimensioni e tipologie di apparecchiature per cui sono state

riscontrate poche perdite sono state raggruppate insieme, ad esempio tutte le valvole manuali ricadono sotto la stessa categoria (valvole di spurgo, blocco e controllo) così come i serbatoi in pressione (adsorbitore orizzontale/verticale, risurriscaldatore, scrubber, separatore e stabilizzatore). La metodologia di calcolo può essere approfondita attraverso il relativo documento con cui è stata presentata nel 2009 alla conferenza HAZARDS XXI [50].

Le frequenze di rottura sono tabulate in funzione della dimensione dell'apparecchiatura e del foro, un'altra distinzione è fatta in funzione della pressione: caso "full pressure" cioè quando il rilascio ha inizio ci si trova alla pressione normale di processo e il caso "zero pressure" cioè quando la pressione all'interno del componente è paragonabile a quella atmosferica.

Nel caso in esame si fa riferimento a rilasci che avvengono alla pressione di processo, che si mantiene costante, di conseguenza i serbatoi atmosferici non sono stati trattati. Questo rappresenta il caso più sfavorevole poiché si ha un rilascio continui di sostanza infiammabile; il problema può essere visto come rilascio di gas da un serbatoio infinito che quindi non si depressurizza.

In Tabella 3 e Figura 20 sono riportati, in forma tabulare e grafica, i valori di frequenza di rottura relativi ai compressori centrifughi presenti sulle statistiche [45][46], che rappresentano una delle 11 tipologie di componente. La dimensione delle apparecchiature rappresenta la taglia del componente ed è espressa in pollici (in), 1 in = 25,4 mm.

COMPONENTE	Compressore Centrifugo					
SCENARIO		Rilascio all	la pressione d	li processo		
Diametro di rottura		Dimens	ione apparec	chiatura		
[mm]	0,5 in	1 in	2 in	4 in	6 in	
1 - 3	5,80E-03	5,80E-03	5,80E-03	5,80E-03	5,80E-03	
3 - 10	2,46E-03	2,46E-03	2,46E-03	2,46E-03	2,46E-03	
10 - 50	1,44E-03	1,44E-03	1,06E-03	1,06E-03	1,06E-03	
50 - 150	0,00E+00	0,00E+00	3,77E-04	3,77E-04	2,26E-04	
>150	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,52E-04	

Tabella 3 - Frequenze di rilascio compressore centrifugo

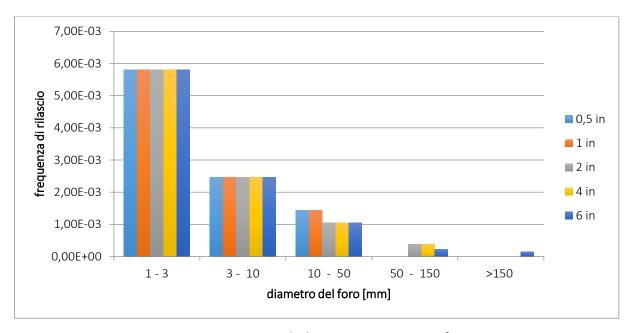


Figura 20 – Frequenze di rilascio compressore centrifugo

Sono state introdotte alcune semplificazioni, di seguito sono riportati i passi seguiti durante la trattazione:

 Alcuni componenti (compressori, scambiatori, pompe e valvole) presentano delle sottocategorie, queste ultime sono state accorpate ottenendo un'unica tipologia di componente. In Tabella 4 e Tabella 5 è riportato un estratto dalle tabelle di frequenza per un compressore rispettivamente centrifugo e alternativo. Seguendo una logica conservativa, le due sottocategorie sono state accorpate scegliendo, per ciascuna dimensione del componente e per ciascun intervallo di diametro di rottura, la frequenza di rottura più elevata. Il risultato è riportato in Tabella 6

Diametro foro		Dimen	sione apparecch	niatura	
[mm]	0,5 in	1 in	2 in	4 in	6 in
1 - 3	5,80E-03	5,80E-03	5,80E-03	5,80E-03	5,80E-03

Tabella 4 – Frequenza di rilascio compressore centrifugo

Diametro foro	Dimensione apparecchiatura						
[mm]	0,5 in	1 in	2 in	4 in	6 in		
1 - 3	3,69E-02	3,69E-02	3,69E-02	3,69E-02	3,69E-02		

Tabella 5 - Frequenza di rilascio compressore alternativo

## SELEZIONE DEL COMPRESSORE CON FREQUENZA PIU' ELEVATA

	Diametro foro		Dimen	sione apparecch	niatura
[mm]	0,5 in	1 in	2 in	4 in	6 in
1 - 3	Alternativo	Alternativo	Alternativo	Alternativo	Alternativo

Tabella 6 – Selezione tipologia compressore con frequenza più elevata

- Non avendo i dati reali di ciascun componente, è stata fatta un'ulteriore semplificazione, fissato l'intervallo di diametro di rottura, accorpando le frequenze di rilascio per le diverse dimensioni dell'apparecchiatura. Rispettando il criterio di scelta conservativo, è stato selezionato il valore di frequenza più elevato. Dalla Figura 20 si può notare come, per i diversi diametri di rottura, la frequenza di rottura è uguale o dello stesso ordine di grandezza al variare della taglia del componente.
- Dalla Tabella 3 è possibile notare che la suddivisione secondo i diametri di rottura è costituita da 5 intervalli. Ci si è ricondotti a tre intervalli, Figura 21:
  - Foro con diametro tra 1 3 [mm],
  - Foro con diametro tra 3 50 [mm],
  - Foro con diametro tra 50 150 [mm].

Gli intervalli da 3 a 10 mm e da 10 a 50 mm sono stati accorpati scegliendo la frequenza maggiore, la suddivisione è stata scelta rispettando gli intervalli proposti da [45] e [46] e per ragioni numeriche, al fine di rendere possibile l'accoppiamento tra le simulazioni della fase di rilascio e la quelle della fase di dispersione, nel CAPITOLO 4 è discusso più nel dettaglio il modello ibrido utilizzato per le simulazioni. Nell'ALLEGATO I sono riportati i grafici e le tabelle di tutti i componenti.

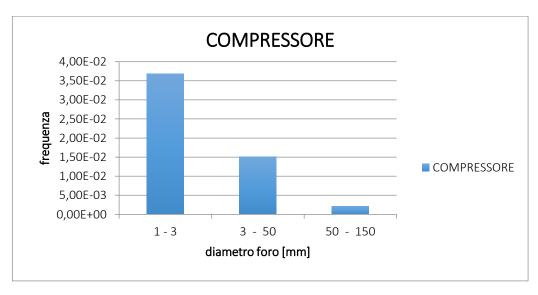


Figura 21 – Frequenza di rilascio semplificata compressore

A partire dal layout di piattaforma in Figura 16, è stata condotta una analisi delle diverse apparecchiature individuate, per ricondurre i singoli componenti agli 11 presenti sulle statistiche. In Tabella 7 è proposta la suddivisione scelta:

(	componente sul layout		componente sulle statistiche	Pressione [bar]
		1	compressore	24
В	SCRUBBER DEL COMPRESSORE DI	4	scambiatore di calore	24
Ь	ASPIRAZIONE	9	valvola x 4	24
	AJI IIIAZIONE		serbatoio di processo pressurizzato	24
		1	compressore	77
С	SCRUBBER DEL COMPRESSORE DI	4	scambiatore di calore	77
C	SCARICO	9	valvola x 4	77
		10	serbatoio di processo pressurizzato	77
D	TRATTAMENTO OLIO	10	serbatoio di processo pressurizzato	77
D	TIVAT TAIVILINTO OLIO	9	valvola x 12	77
		7	pompa	50
			flangia x 6	50
Е	UNITÀ LACT	10	serbatoio di processo pressurizzato	50
_		2	filtro	50
			valvola x 2	50
			valvola x 4	50
			serbatoio	≈ ambiente
G	SERBATOIO OLIO SECCO	3	flangia x 2	50
J	SENDATOIO OLIO SECCO	9	valvola x 2	50
		2	filtro	85
	PIG TRAP	5	pig traps	50
		10	serbatoio di processo pressurizzato	77
L	SEPARATORE DI GAS	2	filtro	77
_	SELVINATIONE DI GAS	3	flange x 2	77
		9	valvola x 2	77
М	RIGENERATORE DI	10	serbatoio di processo pressurizzato x 2	20
141	GLICOLE	7	pompa	20

		3	flangia x 2	20
		9	valvola x 10	20
		2	filtro	20
		4	scambiatore di calore x 2	20
		7	pompa	20
N	POMPA GLICOLE	3	flangia x 2	20
		9	valvola x 2	20
		10	serbatoio di processo pressurizzato	20
_		3	flangia x 2	20
0	SERBATOIO GLICOLE	9	valvola x 2	20
			filtro	20
			serbatoio	≈ ambiente
		3	flangia x 2	20
PeQ	SERBATOIO DIESEL	9	valvola x 2	20
			filtro	20
			pompa	20
		10	serbatoio	≈ ambiente
ReS	GENERATORE DI POTENZA	9	valvola x 2	50
		3	flangia x 2	50
		10	serbatoio di processo pressurizzato	50
Т	T SEPARATORE		flangia x 2	50
		9	valvola x 2	50
		10	serbatoio di processo pressurizzato	77
U	SEPARATORE	3	flangia x 2	77
		9	valvola x 2	77

Tabella 7 – Definizione componenti

Le tubazioni e i relativi raccordi sono i componenti presenti in maggior numero sulla piattaforma. Non essedo stati rappresentati graficamente tali componenti sul layout, per tener conto della loro presenza sono stati considerati come distribuiti lungo una griglia con passo di 3 [m] lungo la lunghezza e passo 4 [m] lungo la larghezza della piattaforma, inoltre sono state considerate tre diverse altezze. In Tabella 8 è riassunto il numero di componenti presenti.

	componente	numero totale
1	compressore	2
2	filtro	7
3	flangia	32
4	scambiatore	4
5	pig traps	1
6	tubazione	150
7	pompa	5
8	raccordo	150
9	valvola	56
10	serbatoio pressurizzato	10

Tabella 8 - Numero totale per ciascuna tipologia di componente

Di seguito è esposto il metodo stocastico utilizzato per la definizione dello scenario e implementato sul software Matlab.

Il primo passo è stato quello di costruire una distribuzione di frequenza per le diverse apparecchiature. Per tenere conto della diversa frequenza di rottura delle apparecchiature e del numero di componenti presenti sulla piattaforma, il valore di frequenza globale è stato ottenuto moltiplicando il valore massimo di frequenza per ciascun componente e il numero di componenti (Tabella 8). In Figura 22 è riportato il grafico che mostra la distribuzione di frequenza, necessaria per la costruzione della funzione di distribuzione e della cumulata. Quest'ultima rappresenta lo strumento matematico per svolgere la simulazione Monte Carlo.

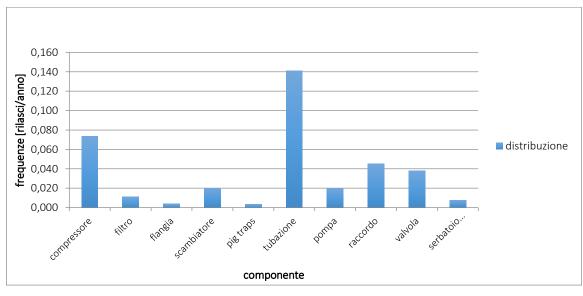


Figura 22 - Distribuzione frequenza di rilascio moltiplicata per il numero di componenti

La funzione cumulata è costruita integrando la distribuzione di frequenza, assumendo che ciascun range sulle ascisse abbia valore unitario, e successivamente normalizzando rispetto al valore finale, che corrisponde alla somma di tutte le frequenze. La cumulata, nel caso di variabile casuale discreta, è definita come in {2}:

$$F_{\zeta}(t) = P[\zeta \le t] \tag{2}$$

 $F_{\zeta}(t)$  = funzione cumulata calcolata in t;

 $P[\zeta \leq t]$  = probabilità che la variabile random assuma un valore minore o uguale a t;

# $\zeta$ = variabile random.

Essendo una probabilità, i valori assunti dalla cumulata devono essere compresi tra 0 e 1, dunque deve essere verificata la condizione di normalizzazione. Questa funzione rappresenta la probabilità che la variabile random possa assumere valori minori o uguali a t.

Nel caso di interesse la probabilità è ottenuta dai valori normalizzati della frequenza e la variabile random è definita come segue:

$$\zeta = \begin{cases} 1 & \textit{se } t = \textit{compressore} \\ 2 & \textit{se } t = \textit{filtro} \\ 3 & \textit{se } t = \textit{flangia} \\ 4 & \textit{se } t = \textit{scambiatore} \\ 5 & \textit{se } t = \textit{pig traps} \\ 6 & \textit{se } t = \textit{tubazione} \\ 7 & \textit{se } t = \textit{tubazione} \\ 8 & \textit{se } t = \textit{raccordo} \\ 9 & \textit{se } t = \textit{valvola} \\ 10 \textit{se } t = \textit{serbatoio pressurizzato} \end{cases}$$

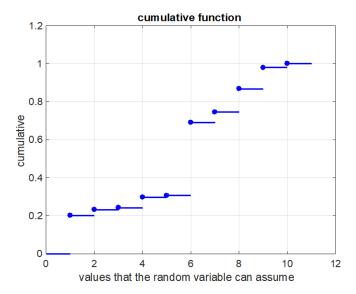


Figura 23- Funzione cumulata per i componenti

La variabile random è utile per descrivere matematicamente un evento, in funzione della grandezza di interesse. In Figura 23 è rappresentato il grafico che si riferisce alla funzione cumulata ottenuta per i componenti. Per definire lo scenario infine è stato applicato il metodo della trasformazione inversa per generare N numeri random discreti tra 0 e 1; ad esempio, se il numero random generato sull'asse delle ordinate è compreso tra 0 e 0,2 (valore della cumulata normalizzata), il corrispondente componente identificato per lo scenario di rilascio è t=1, cioè il compressore, e analogamente per tutti i successivi intervalli. In generale è dimostrato che il metodo Monte Carlo converge, è possibile calcolare il numero di esperimenti, N, tale per cui l'errore del risultato della simulazione sia minore di una certa tolleranza; nel presente elaborato è stato fissato N=1000, considerato sufficiente per generare un set esaustivo di scenari di rilascio.

Definito da quale tipologia di componente si ha il rilascio di gas, sono generati nuovi numeri random per definire lo specifico componente. Partendo dall'assunzione che la probabilità di avere il rilascio dal componente n piuttosto che m (appartenenti alla stessa categoria) sia la medesima, per tutte le categorie eccetto tubazioni e raccordi, sono stati generati numeri random interi tra 1 e il numero di componenti (Tabella 8) per definire il punto di rilascio, nota la posizione di ciascun componente sul layout. Per le tubazioni e i raccordi, definite secondo una griglia lungo le tre dimensioni, sono stati generati numeri random interi tra 1 e il numero di sezioni della griglia (x tra 1 e 10, y tra 1 e 5 e z tra 1 e 3) per ciascuna dimensione e come risultato sono state ottenute le coordinate spaziali (x,y,z) del punto di rilascio.

Analogamente la causa di rilascio è definita generando un numero random tra 1 e 7, a ciascuno è associata una causa di rilascio, poiché non sono presenti dati di probabilità relativa a ciascuna causa, sono considerati eventi equiprobabili.

In Tabella 9 è riportato un estratto della tabella risultante con tutti gli scenari di rilascio generati stocasticamente.

scenario	causa	componente	х	У	Z	numero componente
1	'6_eventi_esterni'	'pump'	-	ı	ı	2
2	'7_errore_design'	'valves'	-	1	ı	18
3	'1_errore_operativo'	'flange'	-	-	1	32
4	'7_errore_design'	'compressor'	-	-	-	2
5	'5_offset_parametri_processo'	'filter'	-	-	-	3
6	'1_errore_operativo'	'pipe'	1	4	2	-

Tabella 9 - Definizione scenari di rilascio

## 3.6 Pressione di rilascio

La pressione di rilascio è la pressione che si ha in corrispondenza della sezione di rottura, dunque è legata al componente. Nel presente elaborato sono considerati rilasci continui. Un rilascio si dice continuo quando la portata di scarico è pressoché costante e perdura per un intervallo di tempo significativo [52], quindi anche la pressione alla sezione di sbocco rimane costante.

La pressione è un dato di progetto, dipende dal processo svolto all'interno del singolo componente e dai limiti tecnologici delle singole apparecchiature. È stata svolta una analisi delle pressioni dei diversi processi e apparecchiature su una piattaforma oil&gas, in ALLEGATO II è presentata una tabella riassuntiva. La pressione di una tubazione dipende dal componente a monte e da quello a valle, viene regolata attraverso le valvole di laminazione, quindi lungo lo stesso tratto di condotto la pressione varia. Per le tubazioni e i raccordi è stata stabilita una pressione media tra quella di tutti i componenti, dal momento che non sono state definite le singole tubazioni, non può essere fissata con certezza una pressione per ogni sezione della griglia. Non è stata utilizzata la pressione massima perché, dal punto di vista della sensoristica, questa non rappresenta la situazione peggiore.

Scelto il componente da cui si ha il rilascio per ciascuno scenario, la pressione è definita di conseguenza (ALLEGATO II).

### 3.7 Diametro di rottura

Il diametro di rottura è definito stocasticamente con il metodo utilizzato per la scelta del componente. I dati di frequenza di rilascio sono suddivisi secondo tre diverse taglie:

- Fori con diametro tra 1 3 [mm], sono i più frequenti ma apparentemente i meno pericolosi. La source-box risultante avrà una dimensione caratteristica inferiore ai 10 [cm] e di conseguenza la prima fase di rilascio è stata simulata come getto libero, cioè senza ostacoli all'interno della source-box; è stata ipotizzata una distanza minima di 10 [cm] per tubazioni che corrono in parallelo, le distanze tra le altre apparecchiature sono superiori, nell'ordine del metro.
- Fori con diametro tra 3 50 [mm], sono quelli di maggiore interesse, a differenza della categoria precedentemente descritta, la dimensione della source-box è tale da permettere di valutare l'interazione tra getto e ostacolo, ma specialmente si ottiene una portata di rilascio che non sia eccessivamente esigua.
- Fori con diametro tra 50 150 [mm], sono i meno frequenti e la dimensione della source-box cresce notevolmente per queste dimensioni di foro, tale da essere paragonabile alle dimensioni della piattaforma.

### Per la definizione dello scenario:

• è stato associato un valore della variabile random per ciascuna categoria di foro:

$$\zeta = \begin{cases} 0 & se \ 1 < d < 3 \ mm \\ 1 & se \ 3 < d < 50 \ mm \\ 2 & se \ 50 < d < 150 \ mm \end{cases}$$

- è stata tracciata la distribuzione di frequenze per le tre diverse categorie in funzione del componente Figura 21;
- è stata costruita la cumulata integrando sulle frequenze, assumendo che ciascun range sull'asse delle ascisse abbia valore unitario;
- la cumulata è stata normalizzata dividendo per il suo valore massimo;
- attraverso il metodo della trasformazione inversa sono stati generati numeri random sull'asse delle ordinate, tali valori vengono intersecati con la cumulata ed infine si legge sull'asse delle ascisse il valore della variabile random, che corrisponde ad uno dei tre intervalli di dimensione del foro, Figura 21.

# 3.8 Direzione di rilascio

La direzione di rilascio è intesa come la direzione relativa rispetto al Nord della piattaforma. Nel presente lavoro è fissato il Nord della piattaforma in coincidenza con il Nord geografico, perché il nord è per convenzione orientato parallelamente al Nord reale [53]. In Figura 24 è mostrata la disposizione geografica della piattaforma, per maggiore chiarezza è rappresentata solo la cabina elettrica.

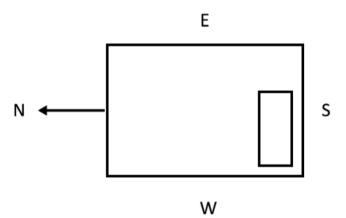


Figura 24 – Orientamento piattaforma

Per la definizione della direzione di rilascio, per ciascuno scenario, è stata eseguita una simulazione Montecarlo scegliendo tra 8 diverse direzioni considerate egualmente probabili. Queste ultime rappresentano l'orientamento della faccia della source-box dalla quale si ha il rilascio; in prima approssimazione 8 diverse direzioni possono essere considerate sufficienti per coprire in maniera esaustiva i 360° e sono rappresentate in Figura 25.

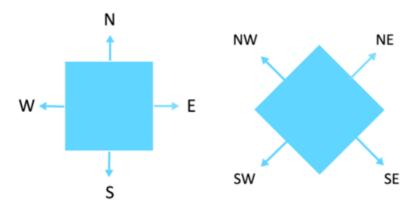


Figura 25 - Direzione di rilascio

#### 3.9 Direzione e intensità del vento

I dati relativi alle condizioni climatiche sono tratti dal sito dell'ISPRA [57]. In assenza di stazioni meteo in mare aperto, è stata scelta come riferimento, per i dati di intensità e direzione del vento, Ravenna, Figura 26, sia per la maggiore densità di piattaforme nell'alto Adriatico sia per condizioni di vento più sfavorevoli.

Nel caso in esame per sfavorevole si intende calma di vento, il che non favorisce la diluizione dell'inquinante in atmosfera e aumenta il rischio di incidente.

Le caratteristiche del vento, cioè direzione e intensità, possono essere considerate come eventi stocastici poiché ripetendo la misura, alla stessa ora e nello stesso punto, non è certo che sia ottenuto lo stesso risultato. Essendo un fenomeno meteorologico, il vento dipenderà dalla posizione geografica e dall'anno, sarebbe opportuno costruire le distribuzioni considerando i dati che si riferiscono a più anni, tuttavia, in mancanza di dati completi per gli altri anni, nel presente elaborato è stato considerato il 2014.

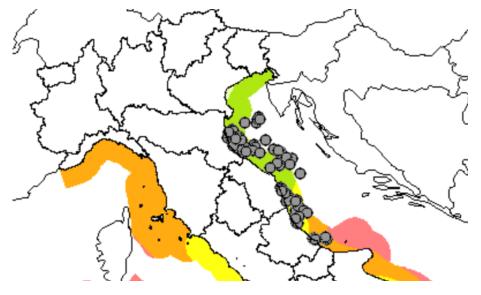


Figura 26 – Posizione piattaforme nel mare Adriatico e intensità del vento [54]

È stata svolta una ricerca in letteratura per trovare i modelli probabilistici che descrivano in maniera efficiente le grandezze in esame. I modelli statistici di interesse sono la distribuzione circolare per la direzione [55] e la distribuzione di Weibull per l'intensità del vento [56].

Dal sito [57] è possibile scaricare i dati orari di direzione e velocità del vento. La direzione è espressa in gradi Azimut rispetto al Nord, Tabella 10, e rappresenta la direzione di provenienza del vento. In Figura 27 è riportata la distribuzione circolare relativa all'intensità del vento ottenuta per l'anno 2014. Il grafico è in coordinate polari e si riferisce all'intervallo di velocità del vento tra 0 e 99 [m/s]: l'angolo corrisponde ai gradi Azimut rispetto al Nord e il raggio al numero di campionamenti per ogni grado.

DIREZIONE	°N
N	0
NE	45
E	90
SE	135
S	180
SW	225
W	270
NW	315

Tabella 10 - Gradi Azimut

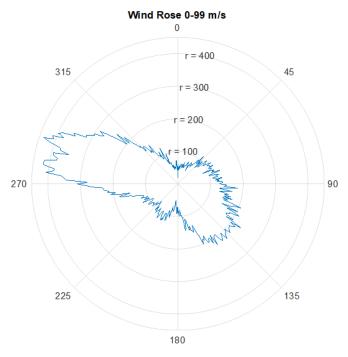


Figura 27 - Distribuzione di frequenza circolare per l'intensità del vento

Esistono diverse tipologie di distribuzione circolare, nel caso in esame è stata scelta la più semplice, cioè la distribuzione circolare uniforme {3}; potrebbe essere svolto uno studio più approfondito per trovare quale sia la distribuzione circolare migliore per descrivere i dati di direzione del vento, ma non essendo questo lo scopo del presente elaborato si è stata svolta una trattazione semplificata.

$$f_{\zeta}(\theta) = \frac{1}{2\pi}, 0 \le \theta \le 2\pi$$
 {3}

In primo luogo l'angolo giro è stato suddiviso in 16 quadranti, cioè con passo 22,5°, successivamente sono state conteggiate le misure appartenenti a ciascun intervallo secondo la seguente logica, mostrata in Figura 28, le misure comprese tra 45°N±22,5° sono state attribuite alla direzione NE, le misure tra 90°N±22,5° alla direzione E, analogamente per i successivi intervalli. È stata impostata la continuità da destra su ciascun intervallo, cioè l'angolo corrispondente a  $22,5^{\circ} \le \theta < 65^{\circ}$ .

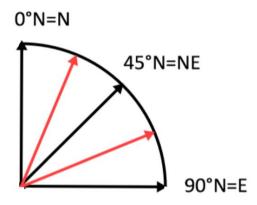


Figura 28 - Criterio di scelta per la distribuzione di frequenza delle direzioni del vento

DIREZIONE	# MISURE	CUMULATA	CUMULATA NORMALIZZATA
N	2567	2567	0,049
NE	4019	6586	0,125
E	6238	12824	0,244
SE	9010	21834	0,415
S	4754	26588	0,506
SW	4397	30985	0,59
W	12904	43889	0,835
NW	8671	52560	1

Tabella 11 - Cumulata distribuzione di frequenza per l'intensità del vento

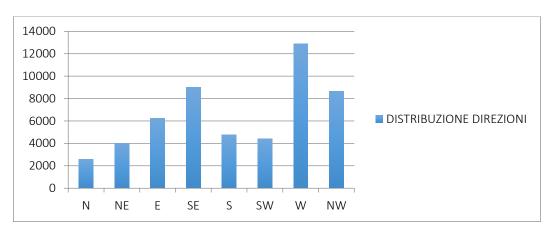


Figura 29 - Distribuzione di frequenza per le 8 direzioni di interesse

In Tabella 11 e Figura 29 sono rappresentati i dati di frequenza ottenuti riguardo le diverse direzioni del vento. Per la costruzione dello scenario di rilascio è stato adottato lo stesso metodo stocastico visto per la definizione casuale del diametro di rottura.

Per l'intensità del vento, lo scenario di rilascio è stato generato campionando valori casuali della velocità secondo la distribuzione di Weibull. L'equazione {4} rappresenta la funzione di densità di probabilità e la {5} la funzione di densità cumulata.

$$f_{\zeta}(u) = \frac{k}{s} \cdot \left(\frac{u}{s}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{u}{s}\right)^k} \tag{4}$$

$$F_{\zeta}(u) = 1 - e^{-\left(\frac{u}{s}\right)^k} \tag{5}$$

La distribuzione di Weibull dipende dai due parametri 's', fattore di scala  $\left[\frac{m}{s}\right]$ , e 'k', fattore di forma, che sono stati ottenuti secondo un metodo di interpolazione grafica riportato negli articoli [58][59]. In Figura 30 sono riportati i grafici ottenuti per le due funzioni, elaborando i dati della stazione meteo di Ravenna per il 2014.

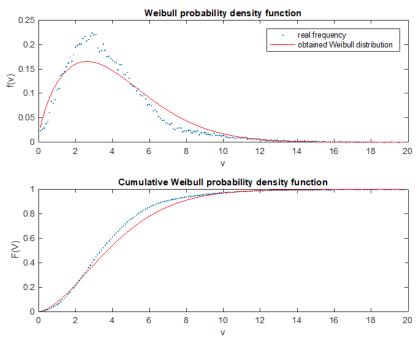


Figura 30 – Distribuzione di Weibull

Il campionamento è stato eseguito con il metodo della trasformazione inversa attraverso l'equazione {6}:

$$u = s \cdot (-\ln \rho)^{\frac{1}{k}} \tag{6}$$

Dove u è la velocità del vento data e  $\rho$  un numero random generato uniformemente nell'intervallo [0,1].

## 3.10 Temperatura ambiente

Inizialmente è stato ritenuto opportuno considerare anche la temperatura ambiente tra le variabili da utilizzare per la costruzione degli scenari. I dati statistici di temperatura sono stati ricavati dal sito dell'ISPRA, anch'essi relativi alla stazione meteo di Ravenna come per l'intensità e direzione del vento.

È stato considerato l'anno 2014 in mancanza di dati completi per l'anno 2013 e 2015. La temperatura massima è 32,8°C e la minima -2,8°C, dunque si rileva una differenza di temperatura massima di circa 35°C. è stata quindi investigata l'influenza della variazione di temperatura sulla dispersione di metano sulla piattaforma, di seguito sono riportate alcune considerazioni in merito:

- La temperatura è di particolare interesse nel caso si tratti di liquido bassobollente e in tal caso è preferibile utilizzare dei rilevatori di liquido piuttosto che di gas [25].
- Alcune tipologie di sensori, specialmente quelli elettrochimici, potrebbero essere danneggiati trovandosi fuori dalle condizioni di funzionamento suggerite dal costruttore, come ad esempio temperature molto rigide. Nel nostro caso non si hanno condizioni metereologiche così estreme.
- La temperatura influenza le classi di stabilità dell'atmosfera, ma queste vengono utilizzate quando si studia la dispersione in ambiente aperto. La piattaforma in esame è da ritenersi un ambiente semi-confinato.
- La temperatura influenza l'intervallo di infiammabilità del gas, ma variazioni sensibili di LFL e UFL si hanno considerando variazioni di temperatura dell'ordine di 100°C.
- La temperatura influenza la densità di un gas ma ad esempio per l'aria passando da 5°C a 40°C la densità varia da 1,316 a 1,146 kg/m³, invece per il metano la densità varia da 0,709 a 0,802 kg/m³.

Per valutare l'influenza della temperatura sul fenomeno di dispersione di gas metano e verificare se sia il caso di includere la temperatura ambiente nella costruzione degli scenari incidentali, sono state condotte quattro simulazioni sul Software Fluent Ansys a quattro differenti temperature, riportate in Tabella 12.

°C	K	rho [kg/m3]	metano	
0	273,2	0,716		
-2,8	270,4	0,709		
26,85	300	0,787	fluent	
32,8	306	0,802		

°C	K	rho [kg/m3]	aria
0	273,2	1,292	
-2,8	270,4	1,306	
26,85	300	1,177	fluent
32,8	306	1,154	

Tabella 12 - Valori di temperatura utilizzati per le simulazioni

Il software utilizzato per le simulazioni prevede, tra le sue impostazioni, una temperatura di default pari a 300K (26,85°C), sono state svolte quattro differenti simulazioni in condizioni stazionarie, mantenendo tutti i settaggi uguali (descritti nel CAPITOLO 4) e variando solamente la temperatura per verificare se questo rappresenta un parametro significativo o meno per la costruzione degli scenari di rilascio.

T [K]	volume CH <sub>4</sub> [m <sup>3</sup> ]
270,35	2,552
273,15	2,566
300	2,619
305,95	2,626

Tabella 13 - Volume di metano rilasciato alle diverse temperature

In Tabella 13 è riportato il volume di metano rilasciato, calcolato sul software Fluent Ansys, in funzione delle diverse temperature. Come si evince dai valori in tabella non si ha una variazione incidente, inferiore al 3%, del volume di metano sulla piattaforma. Successivamente sono stati confrontati i profili di velocità e concentrazione su diversi piani al fine di verificare che la variazione della temperatura ambiente non influenzi in maniera significativa l'andamento della nube, e quindi essere trascurata.

	Frazione	Velocità		Frazione	Velocità		Frazione	
	massica	media		massica	media		massica	v_media
T [K]	СН4	[m/s]	T [K]	СН4	[m/s]		СН4	[m/s]
270,35	0,0117	7,7040	270,35	0,0110	6,610	270,35	0,006	6,119
273,15	0,0119	7,6241	273,15	0,0114	6,533	273,15	0,007	6,043
300	0,0118	7,6884	300	0,0111	6,576	300	0,007	6,027
305,95	0,0119	7,6612	305,95	0,0111	6,528	305,95	0,007	6,035
	Variazione %			Variazione %			Variazione %	
	Frazione			Frazione			Frazione	
	massica			massica			massica	
	CH4	velocità		CH4	velocità		CH4	velocità
	1,58	0,56		1,22	1,26		1,16	1,38

Tabella 14 - Valori di concentrazione e velocità sui diversi piani al variare della Temperatura

In Tabella 14 sono riportati i valori mediati di concentrazione di metano, in termini di frazione massica, e di velocità sui piani. È stata calcolata la variazione percentuale tra i valori estremi delle suddette quantità e in tutti i casi si ottiene un valore inferiore al 2%.

Dopo l'analisi è stato assunto che la variazione di temperatura, considerando il  $\Delta T$  della stazione meteo di riferimento, può essere trascurata e che quindi per le simulazioni si mantiene la temperatura di default del software pari a 300 K.

# 3.11 Risultati relativi alla generazione degli scenari di rilascio

Le variabili descritte nei precedenti paragrafi sono state combinate tra loro attraverso un codice Monte Carlo, elaborato sul software Matlab, al fine di creare un set completo ed esaustivo di condizioni iniziali di potenziali scenari di rilascio (in seguito denominate "scenari di rilascio"). Le variabili sono state considerate statisticamente indipendenti tra loro (due eventi A e B si dicono statisticamente indipendenti se la probabilità che si verifichi A non influenza la probabilità di verificarsi di B), cioè il valore di una variabile non è condizionato dal valore delle altre, ad esempio se si ha un rilascio da foro di 1 cm, piuttosto che di 5 cm, questo non influenza il fatto che il vento abbia una intensità di 6 [m/s] piuttosto che 10 [m/s],dal punto di vista numerico questo significa che i diversi scenari sono stati costruiti generando numeri random indipendenti tra loro per ciascuna variabile. I diversi parametri che caratterizzano ciascuno scenario rappresentano i dati di input e le "boundary conditions" (condizioni al contorno) per le simulazioni CFD, descritte nel capitolo successivo.

Il codice Monte Carlo fornisce in output una tabella le cui righe rappresentano i diversi scenari di rilascio; di seguito, Tabella 15,è riportato un estratto di suddetta tabella per maggiore chiarezza.

SCENARIO	CAUSA	DIREZIONE	COMPONENTE	х	У	Z	indice	taglia foro	direzione del vento	velocità del vento [m/s]
1	'3 errore manutenzione'	'NW'	'compressore'	1	1	1	1	'small'	'E'	9
2	'2 errore latente'	'SE'	'flangia'	1	1	-	23	'medium'	'W'	3
3	'6 eventi esterni'	'SW'	'tubazione'	7	5	3	-	'small'	'NW'	4
4	'7 errore design'	'SE'	'raccordo'	5	2	2	-	'small'	'NE'	4

Tabella 15 - Condizioni iniziali di potenziali scenari di rilascio

La prima colonna identifica lo scenario; la seconda colonna indica la causa per cui si è verificato il rilascio accidentale di gas; la terza colonna riguarda la direzione in cui si ha il rilascio. Le successive colonne, dalla quarta all'ottava, individuano il componente da cui si ha il rilascio e quindi la posizione sul deck; individuata l'apparecchiatura si hanno le coordinate, x, y e z, per quanto riguarda tubazioni e raccordi, mentre l'indice del componente, ALLEGATO II, per tutte le altre, infatti per tali apparecchiature non è prevista una coordinata ma un riferimento al componente. La colonna nove indica la taglia del foro da cui si ha il rilascio; la colonna dieci e la undici riguardano la direzione e l'intensità del vento.

Come detto nel CAPITOLO 2 i risultati ottenuti relativi alla costruzione degli scenari, forniscono i dati di input per la scelta della source-box e la scelta dei parametri per le simulazioni di dispersione di inquinante sulla piattaforma. Inoltre permettono di ottenere il valore di frequenza di accadimento per ciascuno scenario, tale valore sarà inserito tra i dati di input del modello di ottimizzazione.

# CAPITOLO 4 – Stima delle conseguenze degli scenari di rilascio

Nel seguente capitolo è descritto il modello ibrido di source-box, introdotto già nel paragrafo 1.3 Contesto progetto SEADOG, che prevede la separazione della fase di rilascio dalla fase di dispersione, utilizzato per le simulazioni CFD. È riportata una descrizione dei settaggi impostati per la modellizzazione dei tre scenari scelti per il presente caso studio e i risultati ottenuti.

### 4.1 Simulazione CFD

Le simulazioni di rilascio e dispersione di inquinante sono di particolare interesse perché permettono di analizzare e prevedere quali possano essere le conseguenze di un evento indesiderato, come il rilascio incidentale di idrocarburi su una piattaforma offshore.

Il fenomeno analizzato consiste in un getto che si genera dal rilascio in atmosfera di una sostanza gassosa da una apparecchiatura in pressione, inizialmente si ha un getto supersonico sotto espanso (che è trattato come comprimibile), successivamente si ha il miscelamento della sostanza con l'aria, e lontano dalla sorgente la miscela gas-aria può essere trattata come un gas ideale (incomprimibile).

Per lo studio e la simulazione del fenomeno esistono diversi approcci, Figura 31, che si suddividono in base al numero di steps.

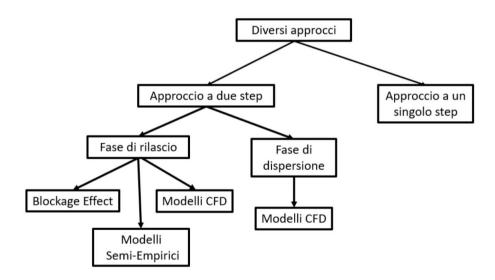


Figura 31 - Approcci per la modellizzazione di un rilascio di gas in pressione [72]

L'approccio a singolo step, prevede che il fenomeno sia trattato in una singola simulazione, cioè non viene distinta la fase di rilascio dalla fase di dispersione, studiato da Moscatello in [21] ha lo svantaggio di richiedere un elevato costo computazionale per ottenere un risultato accurato.

L'approccio a due step separa la fase di rilascio e la fase di dispersione. La fase di rilascio riguarda i fenomeni fisici che avvengono a valle del foro di rottura, quando si ha un rilascio da apparecchiatura in pressione in un ambiente; può essere modellata attraverso modelli semi-empirici o modelli CFD, la scelta dipende dal grado di dettaglio che si vuole ottenere. Le piattaforme offshore presentano una geometria parecchio congestionata, dunque si ha l'interazione del getto con parecchi ostacoli, questo non può essere studiato con i modelli parametrici, motivo per cui si è scelto di adottare i modelli CFD. La fase di rilascio è caratterizzata da velocità del getto elevate, nell'ordine dei 100÷1000 [m/s], le forze predominanti sono di tipo inerziale e la tipologia di moto è comprimibile.

La fase di dispersione riguarda la fase successiva al rilascio, quando il getto rallenta e raggiunge velocità paragonabili a quelle del vento e si ha il miscelamento con l'aria. Le velocità caratteristiche sono nell'ordine dei 1÷10 [m/s], le forze predominanti sono di galleggiamento e di trasporto e la tipologia di moto è incomprimibile. Questa fase è trattata attraverso i modelli CFD. Tra i risultati ottenibili dalle simulazioni della fase di dispersione quelli di interesse sono il volume di infiammabile rilasciato sulla piattaforma, le zone raggiunte dalla nube ed il tempo necessario per raggiungerle.

Per un approfondimento riguardante gli aspetti teorici delle simulazioni CFD di rimanda all'APPENDICE II.

L'approccio seguito nel presente elaborato è quello a due steps, utilizzando il modello di sourcebox, tale modello è stato studiato nei lavori di tesi [19] e [20].

## 4.1.1 Source-box

Come detto in precedenza, nell'approccio a due steps, vengono separate la fase di rilascio e la fase di dispersione benché' il fenomeno fisico sia continuo. Le due fasi sono successive una all'altra ed i risultati della prima fase, modellata attraverso il concetto di source-box, servono come input per la seconda fase di dispersione, Figura 32.

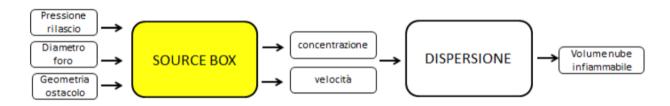


Figura 32 - Schema approccio a due steps con i modello di source-box [19]

La fase di rilascio modellizza i fenomeni fisici che avvengono a valle del foro da cui si ha il rilascio. Si ha la formazione di un getto supersonico e viene studiata l'interazione getto-ostacolo in prossimità della rottura, Figura 33. L'ostacolo rappresenta una possibile tubazione in prossimità del foro da cui si ha il rilascio, sulle piattaforme petrolifere è infatti frequente trovare fasci di tubi in parallelo posti a breve distanza tra loro. Questa fase è stata analizzata da Rupolo in [19], partendo da studi precedenti, e sono state definite le impostazioni per quanto riguarda le simulazioni della fase di rilascio. E' stata analizzata l'interazione tra il getto e un ostacolo di forma cilindrica, con diametro pari a 10 cm che rappresenta una dimensione media tra quelle presenti in piattaforma [45], e ad una distanza di 10 cm dal punto da cui si ha il rilascio, tale distanza realisticamente è la minore a cui possono trovarsi due tubazioni in parallelo.

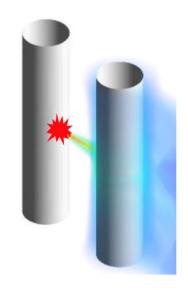


Figura 33 - Rilascio da una tubazione

La fase di dispersione è invece stata analizzata da Carrozza, in [20], che ha definito le impostazioni per una simulazione CFD in condizioni stazionarie, cioè quando la dinamica di evoluzione della nube raggiunge l'equilibrio e si ha la massima quantità di sostanza rilasciata, sul modello di piattaforma del caso studio, in comune con il modello utilizzato nel presente elaborato e in quello di Bono [17].

Le principali differenze tra le due fasi sono il dominio di calcolo, che nel caso del rilascio è rappresentato da un volume modesto, invece nel caso della dispersione è dell'ordine di 1000 m³, e la dimensione della mesh impiegata, poiché nella fase di rilascio avvengono fenomeni di espansione e rarefazione del gas dovute alle rapide variazioni di pressione, temperatura e velocità in spazi molto piccoli e questo richiede una mesh molto fine. Da queste differenze del problema fisico nasce anche la necessità di separare le due fasi nella

modellizzazione numerica con conseguenti differenze sui modelli utilizzati per le simulazioni CFD.

L'introduzione della source-box ha lo scopo di distinguere i due domini, Figura 34, di calcolo e di ridurre i tempi di simulazione per la fase di dispersione, rispetto ad una simulazione a singolo step. All'interno della source-box viene simulata la fase di rilascio, all'esterno la fase di dispersione.

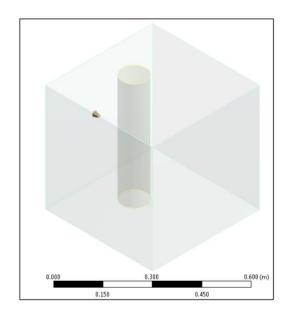


Figura 34 - Dominio della source-box

Il dominio della source-box contiene lo spazio in cui si ha una transizione dalla condizione sonica alle condizioni paragonabili a quelle del vento del getto. Secondo l'ipotesi di Stephens [60] tale spazio è definito ad una distanza di  $10 \times X_{mach}$ , rispetto alla sorgente,  $X_{mach}$  è definito in  $\{7\}$ .

$$X_{mach} = 0.645 \cdot d_{foro} \cdot \sqrt{\frac{P_{serbatoio}}{P_{ambiente}}}$$
 {7}

Dove  $d_{foro}$  è il diametro del foro da cui si ha il rilascio,  $P_{serbatoio}$  è la pressione dell'apparecchiatura da cui si ha il rilascio e  $P_{ambiente}$  è la pressione ambiente.

Dopo aver svolto la simulazione della fase di rilascio, i risultati vengono utilizzati per la simulazione della fase di dispersione, a tal fine la source-box viene posizionata nel punto in cui si suppone avvenga il rilascio sul deck della piattaforma, Figura 35.

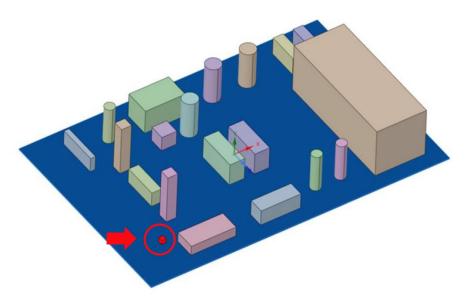


Figura 35 – Posizionamento della source-box sul deck

È importante osservare che una volta definita la dimensione della source-box in riferimento a specifiche condizioni iniziali, questa potrà essere utilizzata come input per la simulazione della successiva fase di dispersione in diverse posizioni della piattaforma senza essere nuovamente calcolata, questo vale a parità di condizioni di processo ma per condizioni metereologiche variabili.

# 4.1.2 Coupling

Un risultato fondamentale del lavoro di tesi svolto in [21] è stato quello di effettuare l'accoppiamento, "coupling", tra le due fasi, di rilascio e dispersione.

Il coupling consiste nell'importare i profili di velocità e concentrazione di metano, presenti sulle facce della source-box sollecitate dal getto, dalla fase di rilascio a quella di dispersione.

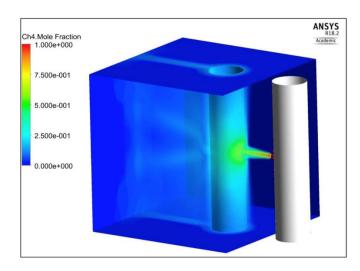


Figura 36 - Output simulazione di rilascio

In Figura 36 è riportata una rappresentazione 3D di ciò che si ottiene da una simulazione di rilascio, in particolare è rappresentata la concentrazione di metano. Essendo presente l'ostacolo all'interno della source-box, le facce di interesse sono quella retrostante all'ostacolo, quella superiore e quella inferiore, perché il getto impattando contro l'ostacolo subisce sia una variazione di velocità, viene rallentato, sia una deviazione in termini spaziali, influenzando le tre facce della source-box indicate; se si trattasse di un getto libero la faccia sollecitata della source-box sarebbe solamente quella frontale al getto.

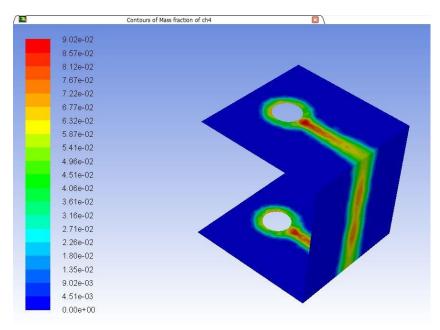


Figura 37 - Profilo di concentrazione importato sulle facce della source-box

In Figura 37 sono rappresentati i profili di concentrazione di metano sulle facce della source-box di interesse nella simulazione di dispersione. È importante notare come le scale di colore siano diverse tra la Figura 36 e la Figura 37 perché rappresentano le due diverse simulazioni. Nella prima si ha la concentrazione di metano pari a 1, in termini di frazione massica, nella sezione di sbocco, il getto prosegue fino ad incontrare l'ostacolo e tende ad avvolgerlo per poi proseguire nella zona retrostante. Durante questa fase si ha già una diminuzione della concentrazione di metano dovuta al miscelamento con l'aria, infatti nella seconda immagine si riscontra una concentrazione massima intorno a 0.009 (frazione massica di CH<sub>4</sub>) a valle dell'ostacolo in linea con l'asse del getto.

Partendo dal catalogo di simulazioni di rilascio effettuato da Rupolo in [19] è stata utilizzata la procedura di coupling per le simulazioni di dispersione eseguite nel presente elaborato in condizioni transitorie, per condizioni transitorie si intende l'analisi dell'evoluzione temporale della nube durante il processo di dispersione.

Le simulazioni di dispersione sono state condotte selezionandone 3, dal catalogo di scenari di rilascio generati nel CAPITOLO 3, tenendo conto del fatto che il suddetto catalogo non è ancora stato completato per tutti i casi di pressione di rilascio e dimensione del foro considerati negli scenari. Esistono inoltre altri vincoli dovuti alla scelta della mesh e del time-step, grandezze ottenute attraverso una analisi di grid-independence e time-convergence svolte per una intensità del vento pari a 6 [m/s], perchè il punto di partenza per le simulazioni svolte nel presente lavoro di ricerca sono state quelle svolte da Carrozza in 138[20] in cui è stata considerata una intensità del vento pari a 6 [m/s]. Tali analisi sono discusse nei successivi paragrafi.

### 4.2 Approccio modellistico utilizzato per il caso studio

In questo elaborato è stato utilizzato il software Fluent ANSYS 18.2 per modellare le simulazioni di dispersione di gas sulla piattaforma offshore.

Di seguito sono descritte le impostazioni adottate per le simulazioni.

## 4.2.1 Impostazioni preliminari

La prima scelta ricade sulla tipologia del sistema da analizzare, ed è stato scelto "Fluid Flow", cioè l'uso di Fluent come risolutore di problemi aerodinamici, problemi di dispersione di solidi, liquidi e gas, problemi di scambio termico, come riportato in Figura 38.

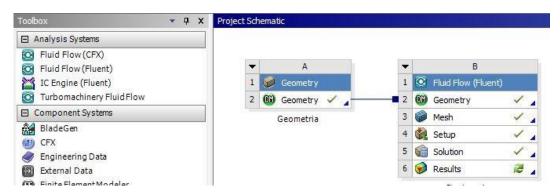


Figura 38 - Area di lavoro sul software Fluent Ansys

La macchina utilizzata possiede 8 processori e una memoria di 64 Gb, tali caratteristiche sono tra le richieste del software per condurre la simulazione, Figura 39.

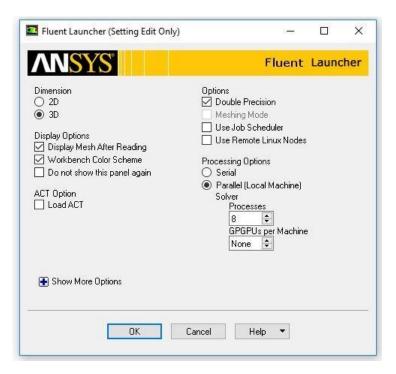


Figura 39 - Fluent Launcher

Con riferimento alla finestra di destra della Figura 39 gli step da seguire per una simulazione di dispersione sono i seguenti e sono descritti nei successivi paragrafi:

- definizione del Volume di calcolo e quindi della geometria;
- definizione della mesh;
- impostazioni di Setup (ad esempio: condizioni al contorno, modello di turbolenza);
- impostazione della soluzione (stazionario o transitorio);
- visualizzazione grafica ed elaborazione dei risultati.

#### 4.3 Geometria

Il dominio computazionale per la simulazione di piattaforme offshore è tipicamente rappresentato attraverso forme semplici come parallelepipedi e cilindri, in riferimento alle forme e ai reali ingombri delle apparecchiature. La geometria del caso studio, definita nel paragrafo 2.4 Descrizione generale del caso studio, rappresenta un tipico deck di produzione di una piattaforma e la pavimentazione è stata considerata di tipo *plated*, cioè si ha una completa separazione tra i diversi deck. Il modello è stato creato sul software SolidWorks ed importato su Fluent. In Figura 40 è riportata la geometria del modello utilizzato, le cui dimensioni sono riportate in Tabella 16, e la definizione del sistema di riferimento, nel caso proposto l'origine degli assi è posto al centro della piattaforma e in corrispondenza della pavimentazione, di seguito le distanze saranno riportate rispetto a tale punto.

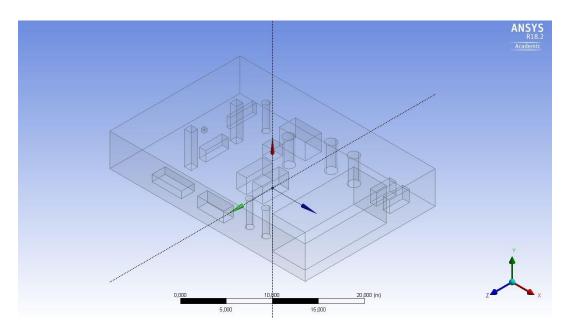


Figura 40 – Geometria della piattaforma e sistema di riferimento

Dimensioni	[m]
Lunghezza	30
Larghezza	20
Altezza	5

Tabella 16 – Dimensioni piattaforma

In Figura 41 è rappresentato il modello 3D della piattaforma utilizzata nel presente caso studio.

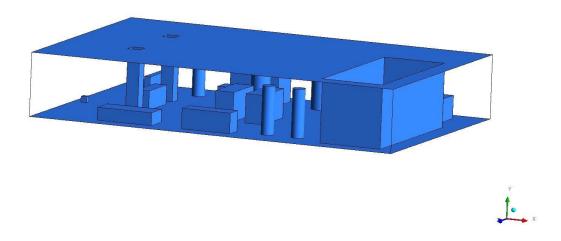


Figura 41 - Modello 3D piattaforma

#### 4.4 Mesh

La definizione della griglia di calcolo è una delle impostazioni più importanti perché da questa dipendono sia l'accuratezza della soluzione sia il costo computazionale della simulazione. Più raffinata è la mesh, maggiore è l'accuratezza ma aumenta anche il tempo di calcolo. Il programma per la generazione della mesh presente sul software permette di inserire le impostazioni mostrate in Figura 42

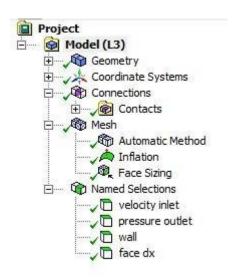


Figura 42 – Opzioni Mesh

Le prime due voci dell'elenco riportato in Figura 42 sono relative alla geometria del modello da studiare e al sistema di riferimento. Il terzo campo permette di analizzare le zone di contatto tra i diversi elementi della geometria, nel caso in esame si hanno due corpi, la piattaforma con i relativi ostacoli e la source-box.

La voce successiva, "mesh", permette di inserire tutte le impostazioni relative alla generazione della griglia di calcolo. Nel presente caso studio è stata impostata una mesh di tipo "Fine", selezionata nella sezione "Size Fuction" e un algoritmo detto "Adaptive", impostatato per adattare la griglia alle geometrie degli ostacoli presenti nel dominio di calcolo, Figura 44, è importante che in prossimità degli ostacoli la mesh sia più fitta perché quella è la zona in cui le grandezze fluidodinamiche subiscono maggiori variazioni.

È stata definita la dimensione degli elementi della griglia pari a 0.2 m, attraverso il parametro "Element Size". È stata inoltre inserita l'opzione "Inflation", Figura 44, che consente di definire degli strati attorno agli ostacoli, attraverso i quali si infittisce la mesh nel loro intorno, ottenendo così una transizione graduale tra la mesh sull'ostacolo, pari a 0.1 m impostata attraverso l'opzione "Face Sizing", e il resto della griglia, per poter meglio modellare i fenomeni fluidodinamici sullo strato limite attorno agli ostacoli.

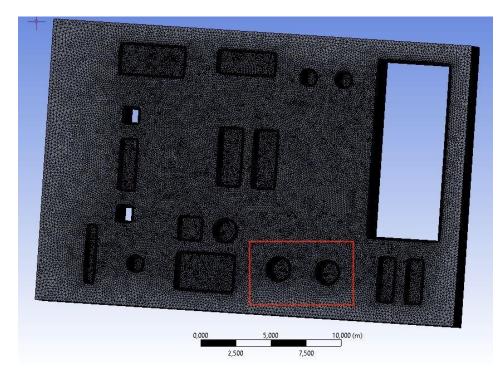


Figura 43 – Mesh dominio di calcolo

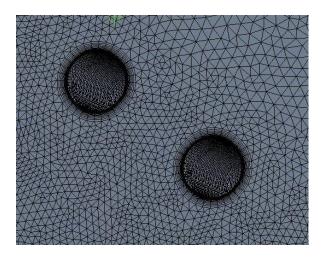


Figura 44- Dettaglio mesh ostacoli e inflation layer

Infine si impostano le "Named Selection" cioè si identificano le superfici su cui saranno impostate le condizioni al contorno, definite nel paragrafo 4.5.1 Boundary Conditions.

## 4.4.1 Grid Independence

Per la scelta della dimensione delle celle della griglia è necessario svolgere una valutazione di "Grid Independence", questa analisi permette di verificare se esiste, e identificare, un numero di celle tale per cui aumentandolo ulteriormente il risultato non presenta variazioni apprezzabili in termini di accuratezza. Si calcolano opportunamente le grandezze di interesse, come velocità e concentrazione, in punti o piani identificati all'interno del dominio di calcolo e viene valutata la variazione di tali parametri in funzione della griglia;

infittendo la mesh si ottiene una variazione sempre inferiore, quando si ottiene una variazione percentuale corrispondente all'accuratezza desiderata si ricava la mesh da utilizzare.

La griglia di calcolo è stata individuata da Carrozza in [20], avendo stabilito la posizione della source-box, Figura 45, con distanza dell'origine della faccia frontale della source-box in (-11.7; 1.5; 7) rispetto all'origine del sistema di riferimento, e una velocità del vento pari a 6 [m/s] proveniente dalla direzione Nord-Ovest.

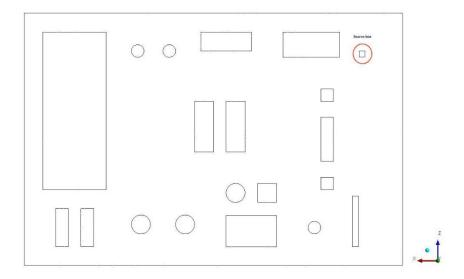


Figura 45 –Posizione 1 source-box

Sono state scelte 5 diverse griglie di calcolo variando l'element size, cioè la dimensione delle celle, i cui valori sono riportati in Tabella 17, e la mesh individuata è la Mesh 3, cioè quella con all'incirca 5 Milioni di elementi.

Sono state eseguite le simulazioni con la diversa griglia di calcolo e successivamente sono stati calcolati i parametri di interesse, cioè velocità e concentrazione, su diversi punti e diversi piani.

	Piattaforma	Ostacoli	# Celle
Mesh 1	0.3	0.15	1.973.119
Mesh 2	0.25	0.125	2.785.041
Mesh 3	0.2	0.1	4.464.767
Mesh 4	0.15	0.075	8.090.710
Mesh 5	0.12	0.05	12.882.001

Tabella 17 - Valori element size per la grid independence

Nel presente elaborato è stata svolta una grid independence in una seconda posizione della source-box, Figura 46, con origine della faccia frontale da cui si ha il rilascio in (-6; 2; 6,5) rispetto all'origine del sistema di riferimento; mantenendo l'intensità del vento pari a 6 [m/s] proveniente da Nord-Ovest e le medesime condizioni di rilascio del caso trattato da Carrozza in [20], questo per verificare se a parità di tali condizioni e modificando solamente la posizione della source-box, la mesh individuata nel primo caso rimane ancora valida.

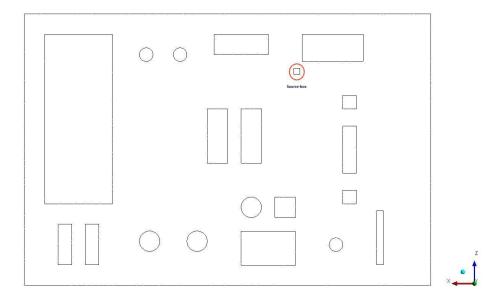


Figura 46 - Posizione 2 source-box

Per svolgere l'analisi di grid independence sono state eseguite le simulazioni di dispersione in condizioni stazionarie successivamente sono stati individuati dei piani all'interno del dominio di calcolo sui quali sono stati calcolati e mediati i valori di concentrazione di metano e di velocità; questo per valutare le variazioni dei suddetti parametri e dell'errore relativo in funzione del numero di celle.

L'errore relativo è definito in base alla soluzione migliore, cioè quella che si riferisce alla mesh più fitta.

$$err_{rel} = \frac{\left|v_{mesh,i} - v_{mesh,5}\right|}{v_{mesh,5}}$$
 {8}

I piani sono piani verticali di dimensione 1x2m, posizionati in modo tale che coprano diverse aree della piattaforma e che siano investiti sia dal flusso di gas infiammabile sia dal campo di vento, ma comunque lontani dalle condizioni al contorno in modo che queste non influenzino il risultato, Figura 47.

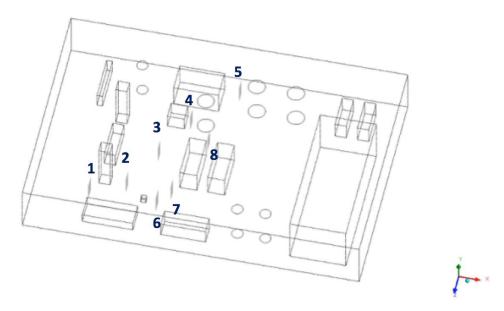


Figura 47 - Posizione dei piani per la grid independence

Di seguito sono riportati i grafici dei risultati ottenuti riguardo l'errore relativo sulla velocità, Figura 48 e Figura 49.

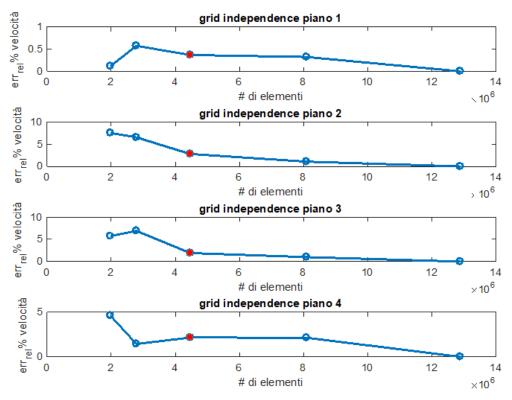


Figura 48 – Grid independence piani 1, 2, 3 e 4

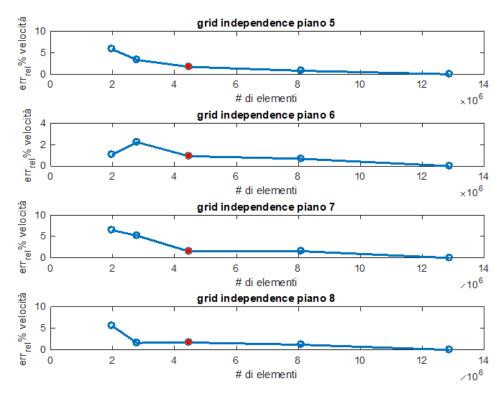


Figura 49 - Grid independence piani 5, 6, 7 e 8

Per la scelta della mesh sono stati analizzati i grafici e sono stati scelti quei valori per cui il costo computazionale non risulti eccessivamente elevato e l'errore relativo percentuale rispetto alla mesh più fine nell'ordine dell'1-2%. Anche per questa seconda posizione la mesh scelta è la Mesh 3.

#### Conclusioni Grid Independence

È bene sottolineare che l'analisi di grid independence andrebbe fatta per ciascuna simulazione, ma per evitare che il costo computazionale cresca eccessivamente, simulando un ampio set di scenari incidentali e ripetendo l'analisi per ogni caso, è stato assunto che per la velocità del vento pari a 6 [m/s] e a parità di condizioni di rilascio la "Mesh 3" sia valida.

#### 4.5 Setup

Nel setup delle simulzioni della fase di dispersione è stata impostata innanzitutto la forza di gravità, che in tal caso influisce sul risultato perché durante questa fase predominano le forze di galleggiamento e i fenomeni di convezione, mentre per la fase di rilascio è trascurata, in quanto durante lo sviluppo di un getto supersonico predominano le forze di tipo inerziale. Successivamente è stata scelta la miscela oggetto dello studio, nel presente caso miscela di aria e metano.

È stato scelto il modello di turbolenza k- $\omega$  SST e per raggiungere una maggiore accuratezza è stato impostato lo schema numerico di risoluzione "second-order upwind", i concetti relativi a tali impostazioni sono riportati in ALLEGATO II.

## 4.5.1 Boundary Conditions

Per poter risolvere il problema sono impostate le seguenti condizioni al contorno, cioè le condizioni necessarie per poter risolvere il sistema di equazioni di Navier-Stokes:

 velocity inlet: impostata sulle superfici da cui si ha l'ingresso del vento, tipicamente il vento è allineato con una o due superfici del dominio computazionale in funzione della direzione, nel presente caso tali superfici sono le superfici laterali Nord e Ovest della piattaforma essendo il vento in direzione entrante da Nord-Ovest; Figura 50.

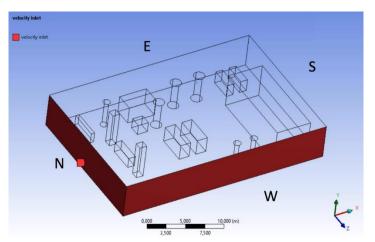


Figura 50 – Velocity Inlet

• pressure outlet: per le altre superfici sottovento, da cui si ha l'uscita del campo di vento dalla piattaforma; Figura 51.

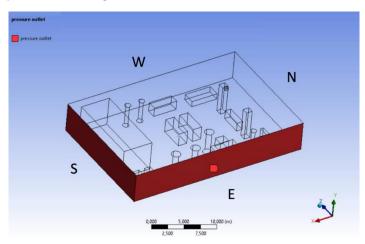


Figura 51 - Pressure Outlet

• velocity inlet: è applicata alle facce della source-box che rappresentano la sorgente del rilascio; Figura 52.

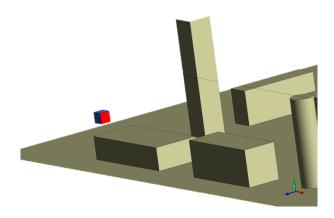


Figura 52 - Velocity Inlet Source-box

• wall: per tutte le altre superfici, cioè quelle degli ostacoli, interdeck superiore e inferiore.

La source-box non è stata definita come "wall", cioè come superficie solida in quanto è attraversata dal vento e dal punto di vista fisico rappresenta la prima fase del rilascio.

#### 4.6 Solution

L'ultima sezione riguarda l'impostazione del tempo, cioè se si vuole condurre una simulazione in condizioni stazionarie o transitorie. Essendo il presente elaborato finalizzato ad individuare le posizioni dei sensori che diano un "early-warning" della presenza di gas sulla piattaforma, cioè le posizioni dove viene raggiunto prima l'LFL o una sua frazione, è stato scelto di condurre le simulazioni in condizioni transitorie questo permette di valutare l'avanzamento della nube in funzione del tempo.

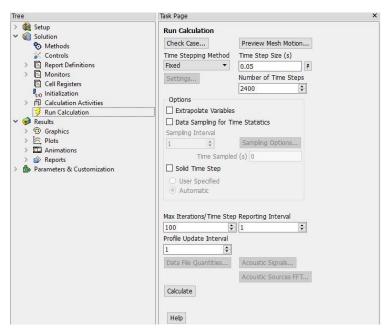


Figura 53 – Impostazioni per il calcolo

È stato definito il time-step, il numero totale di time-steps da simulare in funzione del tempo di rilascio che si vuole simulare e il numero di iterazioni per time-step.

### 4.6.1 Time-Step

La scelta del time-step è stata effettuata partendo dalla condizione di Courant-Friedrichs-Lewy [51], la quale afferma che data una discretizzazione spaziale, nella risoluzione di una equazione numerica, non può essere scelto un time-step maggiore di una certa quantità calcolabile. Fisicamente la condizione impone che il time-step debba essere tale che: il flusso non attraversi più di una cella della griglia all'interno del singolo timestep.

Dalla formula si ricava il dt massimo accettabile in funzione della velocità del vento, v, e della dimensione delle celle,  $\Delta x$ :

$$CFL \le 1$$

$$CFL = \frac{v \cdot dt}{\Delta x}$$

La mesh è stata costruita impostando una dimensione degli elementi pari a 0.2m per il dominio e di 0.1m attorno agli ostacoli, dunque per il calcolo del time-step è stato considerato il  $\Delta x$  più piccolo, per essere certi che la condizione CFL sia rispettata su tutto il dominio. Di seguito, in Tabella 18, si riportano i valori relativi al dt massimo permesso in funzione delle diverse velocità del vento di interesse nel caso in esame.

dx [m]	velocità vento [m/s]	dt [s]
0,1	1	0,1
	2	0,05
	3	0,03
	4	0,03
	5	0,02
	6	0,02
	7	0,01
	8	0,01
	9	0,01
	10	0,01
	11	0,01
	12	0,01
	13	0,01
	14	0,01
	15	0,01
	16	0,01
	17	0,01
	18	0,01
	19	0,01

Tabella 18 - Massimo time-step consentito in funzione della velocità del vento

## Time-step independence

È stato svolta una analisi di time-step independence per provare che la scelta del dt non influenza la soluzione. È stato analizzato il caso di intensità del vento pari a 6 [m/s] per lo scenario 1, Tabella 19, descritto nel paragrafo successivo, dopo aver stabilito la mesh con l'analisi di grid independence.

L'analisi è stata fatta sul volume della nube, scegliendo tre diversi time-steps, e calcolando il volume della nube dopo 4 secondi di dispersione; tale scelta è dettata dal fatto che l'indipendenza dal time-step deve essere fatta lontano dalle condizioni stazionarie, perché in tali condizioni la simulazione converge verso lo stesso risultato e il risultato dell'analisi sarebbe poco significativo.

Il time-steps scelti sono 0.001 s, 0.005 s e 0.02s, per cui si sono ottenuti volumi pari a, rispettivamente, 0.32086, 0.312084 e 0.27654 m<sup>3</sup>. I risultati sono mostrati in Figura 54.

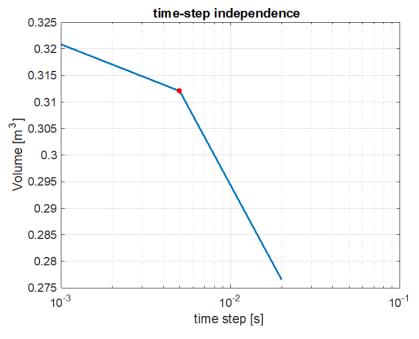


Figura 54 - Time convergence

Il dt scelto è pari a 0.005 s, che rappresenta un valore di compromesso tra l'accuratezza della soluzione e il costo computazionale, il tempo impiegato per svolgere le tre simulazioni è stato:

- ≈3 giorni per simulare 4 s con un dt=0.001;
- ≈30 ore per simulare 4 s con un dt=0.005;
- ≈7 ore per simulare 4 s con un dt=0.02.

#### 4.7 Caso studio

Nel presente caso studio i tre scenari incidentali simulati sono i seguenti:

SCENARIO	CAUSA	DIREZIONE	COMPONENTE	х	У	Z	taglia foro	direzione del vento	velocità del vento [m/s]
1	'1 errore operativo'	'south'	'raccordo'	1	5	2	'medium'	'NW'	6
2	'6 eventi esterni'	'south'	'tubazione'	2	3	1	'medium'	'NW'	6
3	'6 eventi esterni'	'south'	'tubazione'	2	3	1	'medium'	'SE'	6

Tabella 19 - Scenari di rilascio scelti per la simulazione

La scelta è stata fatta scegliendo tra gli scenari con velocità del vento pari a 6 [m/s], direzione del vento non uscente dal dominio di calcolo e, per vincoli esterni, foro di uscita pari a 1 cm, quindi taglia "medium", in quanto le simulazioni della fase di rilascio sono attualmente disponibili dal catalogo solo per questa taglia, e direzione del rilascio nord o sud, in quanto al momento dello svolgimento del presente lavoro di tesi il coupling è stato modellato solamente per questi casi.

I tre scenari scelti rappresentano il rilascio accidentale di gas da una tubazione, per lo scenario 2 e 3, e da un raccordo, per lo scenario 1. Su una piattaforma oil&gas è comune trovare tubazioni che corrono in parallelo, dunque, nonostante queste non siano rappresentate graficamente sulla geometria semplificata utilizzata nel presente caso studio, è una configurazione che ci si può aspettare. Di conseguenza è pertinente utilizzare la source-box descritta, cioè contenente un ostacolo di forma cilindrica al suo interno, questa di adatta al caso dei tre scenari presi in considerazione.

Più in generale, tra gli obiettivi futuri dei lavori di ricerca svolti all'interno del laboratorio Seadog-DENERG c'è l'intenzione di creare una libreria di source-box per la fase iniziale di rilascio, che tengano in considerazione diverse dimensioni del foro di rottura, diversi livelli di pressione e diverse distanze e dimensioni dell'ostacolo posto al suo interno, considerando anche il caso di getto libero, cioè senza ostacolo. Una volta realizzata la suddetta libreria può essere valutato di inserire la scelta della source-box, per le simulazioni della fase di dispersione, tra i parametri utilizzati per la costruzione degli scenari di rilascio, questo se ci si trova nella fase preliminare di design della piattaforma. Invece, nel caso in cui si voglia applicare il metodo sviluppato nel presente elaborato ad un impianto già esistente, la scelta della source-box può essere effettuata analizzando i reali ingombri che si hanno sulla piattaforma.

Prima di svolgere le simulazioni in condizioni transitorie è stata effettuata, per ciascuno scenario, una simulazione convergente in condizioni stazionarie, al fine di verificare la durata effettiva del transitorio. I risultati ottenuti sono riportati di seguito.

#### 4.7.1 Scenario 1

#### CASO STAZIONARIO

In Figura 55 è rappresentato il layout relativo allo scenario 1. Sono stati impostati tutti i parametri descritti nei precedenti paragrafi del presente capitolo ed è stata condotta una simulazione di dispersione di metano sulla piattaforma.

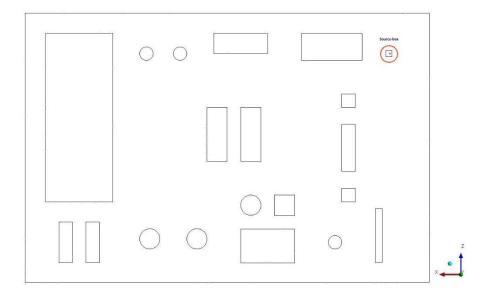


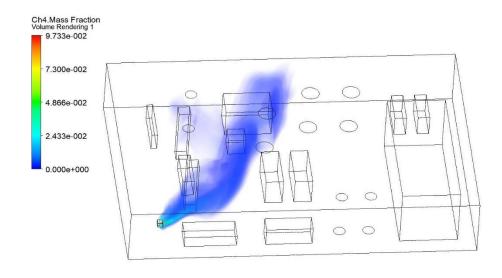
Figura 55 – Geometria scenario 1

Parametri di input			
dimensione del foro	1 [cm]		
pressione di rilascio	10 [bar]		
velocità del vento	6 [m/s]		
direzione del vento	NW		
Mesh	Mesh 3		

Tabella 20 - Tabella riassuntiva parametri di input scenario 1

In Figura 56 è rappresentato il rendering 3D della frazione massica di metano all'interno del dominio di calcolo e la relativa legenda.

Si può notare come la concentrazione di metano diminuisca dopo l'impatto con l'ostacolo, in quanto si ha una diminuzione della velocità e quindi un maggiore miscelamento con l'aria. In Figura 57 è invece riportato in dettaglio il volume di metano entro i limiti di infiammabilità, questa è la grandezza di interesse poiché si vuole rilevare la presenza di gas prima che entri nel campo dell'infiammabile e quindi diventare pericoloso.



-

Figura 56 - Rendering 3D dispersione metano scenario 1 (caso stazionario)

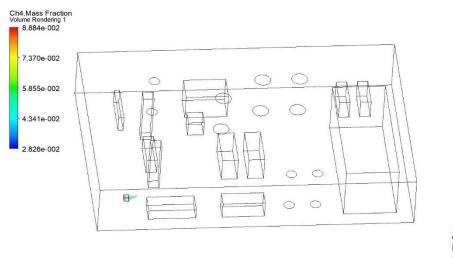


Figura 57 - Volume di metano rilasciato entro i limiti di infiammabilità raggiunte le condizioni stazionarie In Tabella 21 sono riportate le grandezze di interesse calcolate sul software:

Volume totale di metano rilasciato			
3.56E-1	m3		
Volume di metano entro i limiti di infiammabilità LFL-UFL			
4.77E-3 m3			
Volume di metano sopra il 10%di LFL			
1.95E-1	1.95E-1 m3		

Tabella 21- Volume di metano, caso stazionario, scenario 1

La distanza raggiunta dalla nube entro i limiti di infiammabilità è dell'ordine del metro e mezzo, calcolata a partire dalla sorgente di rilascio; il risultato è stato confrontato con una simulazione parametrica svolta sul software DNV Phast [61], il quale permette di simulare getti liberi. È stata svolta una simulazione di rilascio di metano da foro di 1 cm e velocità del vento pari a 6 [m/s] ed è stata calcolata la distanza del getto a LFL, che è risultata di circa 2,3 m.

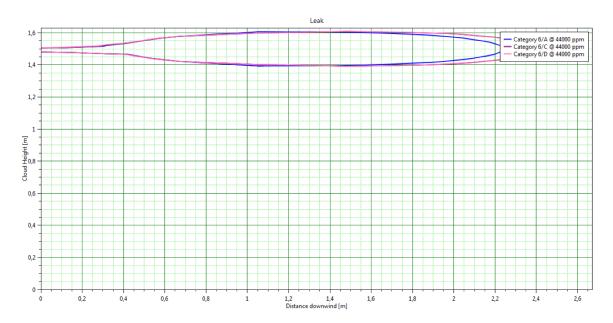


Figura 58 - Simulazione di un getto libero di metano sul Software DNV Phast

La principale differenza tra le due distanze raggiunte sta nel fatto che Phast non consente di inserire l'ostacolo, dunque in questo caso il getto raggiunge una distanza maggiore che nel caso della simulazione svolta su Fluent, dove all'interno della source-box il getto interagisce con un ostacolo e viene rallentato e deviato.

Il confronto è stato fatto per verificare che nel coupling devono essere considerate le tre facce della source-box raggiunte dall'inquinante, cioè quella frontale a valle dell'ostacolo, quella superiore e quella inferiore al fine di ottenere dei risultati realistici dalla simulazione.

# CASO TRANSITORIO

Per la simulazione in condizioni transitorie è stato impostato un dt pari a 0.005 s, come detto in precedenza e la soluzione è stata registrata ogni 200 time-steps allo scopo di poter analizzare il rilascio per ogni secondo di dispersione.

In Figura 59 è riportato il rendering 3D relativo alla dispersione di metano dopo 1 s (200 time-steps). Analogamente la simulazione può essere analizzata per ogni secondo successivo.

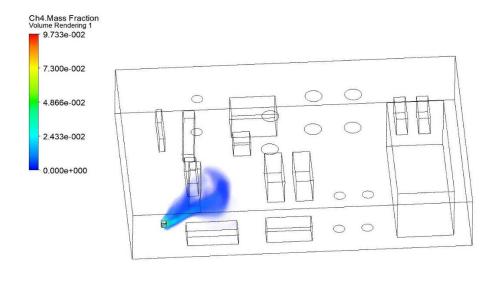




Figura 59 - Rilascio di metano a 1 s, scenario 1

Un primo importante risultato deriva dal confronto del volume di metano tra i diversi timesteps e il caso stazionario al fine di decidere a quale iterazione temporale interrompere la simulazione, questo influenza notevolmente la durata della simulazione, in termini di timesteps da implementare.

A monte della simulazione dello scenario di rilascio 1, è stata effettuata una prima simulazione di prova, in particolare è stata svolto in condizioni transitorie il caso trattato da Carrozza in [20] per verificare i settaggi da utilizzare ed è stata impostata per la durata di 60 s di rilascio, questo ha comportato un tempo di circa 12 giorni di simulazione.

Nel presente caso sono stati calcolati i volumi di metano rilasciati per ogni secondo e confrontando con i valori in Tabella 21 è risultato che la condizione stazionaria si raggiunge a circa 11 s. I valori calcolati a 11 s sono riportati in Tabella 22.

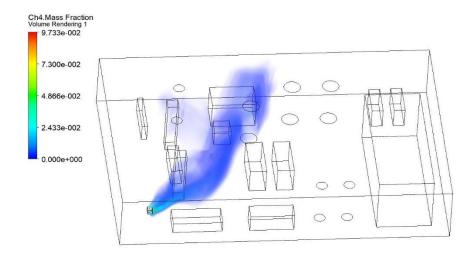




Figura 60 - Rilascio di metano a 11 s, scenario 1

Volume totale di metano rilasciato				
3.56E-1	m3			
Volume di metano entro i limiti di infiammabilità LFL-UFL				
4.78E-3	4.78E-3 m3			
Volume di metano sopra il 10%di LFL				
1.93E-1	m3			

Tabella 22 - Volume di metano a 11 s

Questa osservazione e la scelta della durata del rilascio di 11 s ha permesso di ridurre i tempi di calcolo a circa 4 giorni.

## 4.7.2 Scenario 2

## CASO STAZIONARIO

Analogamente per il secondo scenario è stata svolta inizialmente una simulazione in stazionario e successivamente in condizioni transitorie. In Figura 61 è rappresentato il layout relativo allo scenario 2 ed in Tabella 23 sono riportati i parametri di input utilizzati per la simulazione.

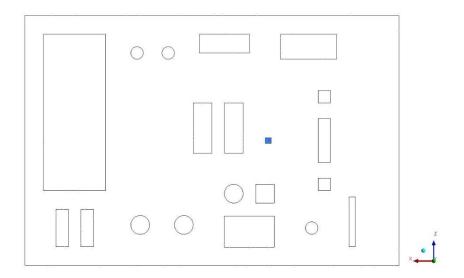


Figura 61 – Geometria scenario 2

Parametri di input			
dimensione del foro	1 [cm]		
pressione di rilascio	10 [bar]		
velocità del vento	6 [m/s]		
direzione del vento	NW		
Mesh	Mesh 3		

Tabella 23- Tabella riassuntiva parametri di input scenario 2

In Figura 62 è rappresentato il rendering 3D della frazione massica di metano all'interno del dominio di calcolo e la relativa legenda, in Tabella 24 invece è riportato il volume di metano, totale ed entro i limiti di infiammabilità, calcolato con il software Fluent-Ansys.

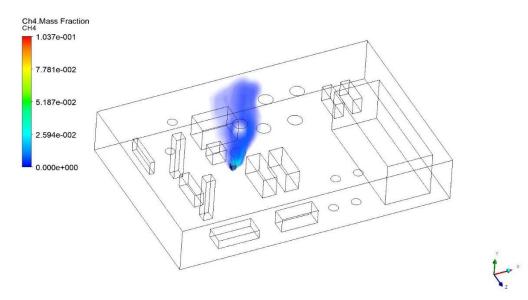


Figura 62 - Rendering 3D dispersione metano scenario 2 (caso stazionario)

Volume totale di metano rilasciato			
1.56E-1	m3		
Volume di metano entro i limiti di infiammabilità LFL-UFL			
4.63E-3	4.63E-3 m3		
Volume di metano sopra il 10%di LFL			
1.14E-1	m3		

Tabella 24 - Volume di metano, caso stazionario, scenario 2

#### CASO TRANSITORIO

Per la simulazione in transitorio è stato impostato un dt pari a 0.005 s, come definito attraverso lo studio di time-convergence. In Figura 63 è riportato il rendering 3D relativo alla dispersione di metano dopo 1 s e in Tabella 25 invece è riportato il volume di metano, totale ed entro i limiti di infiammabilità, calcolato con il software Fluent-Ansys.

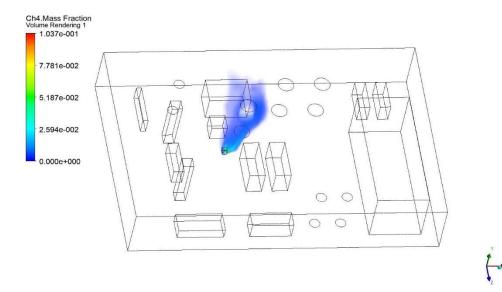
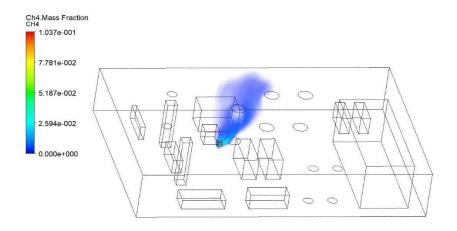


Figura 63 - Rilascio di metano a 1 s, scenario 2

Volume totale di metano rilasciato			
1.05E-1 m3			
·			
Volume di metano entro i limiti di infiammabilità LFL-UFL			
3.84E-3 m3			
Volume di metano sopra il 10%di LFL			
6.94E-2	m3		

Tabella 25 - Volume di metano, caso transitorio a 1 s, scenario 2

Anche per lo scenario 2 è stata analizzata la variazione dei volumi di metano tra i vari timesteps ed in questo caso già dopo 9 secondi di dispersione si raggiunge una condizione paragonabile al caso stazionario. In Figura 64 si può osservare la forma della nube a 9s e in Tabella 26 il volume calcolato con il Software Fluent Ansys.



× ×

Figura 64 - Rilascio di metano a 9 s, scenario 2

Volume totale di metano rilasciato			
1.55E-1	1.55E-1 m3		
·			
Volume di metano entro i limiti di infiammabilità LFL-UFL			
4.53E-3 m3			
Volume di metano sopra il 10%di LFL			
1.14E-1	m3		

Tabella 26 - Volume di metano, caso transitorio a 9 s, scenario 2

## 4.7.3 Scenario 3

## CASO STAZIONARIO

Per lo scenario 3 è stata mantenuta la posizione della source-box come nello scenario 2, è stata invece modificata la direzione del vento, questa volta entrante da Sud-Est, dunque sono state invertite le boundary-conditions di velocity inlet e pressure outlet sui bordi della piattaforma. In Tabella 27 sono riportati i parametri di input utilizzati per la simulazione.

Parametri di input			
dimensione del foro	1 [cm]		
pressione di rilascio	10 [bar]		
velocità del vento	6 [m/s]		
direzione del vento	SE		
Mesh	Mesh 3		

Tabella 27 - Tabella riassuntiva parametri di input scenario 3

In Figura 65 è rappresentato il rendering 3D della frazione massica di metano all'interno del dominio di calcolo e la relativa legenda, in Tabella 28 invece è riportato il volume di metano, totale ed entro i limiti di infiammabilità, calcolato con il software Fluent-Ansys.

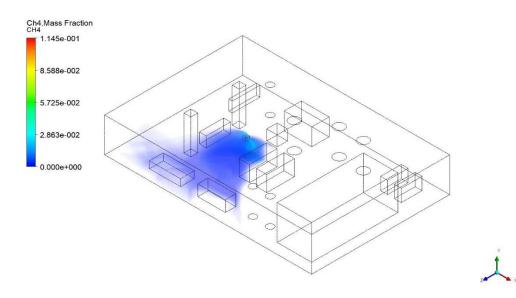


Figura 65 - Rendering 3D dispersione di metano scenario 3 (caso stazionario)

Volume totale di metano rilasciato				
5.07E-1 m3				
Volume di metano entro i limiti di infiammabilità LFL-UFL				
1.33E-3 m3				
Volume di metano sopra il 10%di LFL				
2.29E-1	2.29E-1 m3			

Tabella 28 - Volume di metano, caso stazionario, scenario 3

#### CASO TRANSITORIO

Per la simulazione in transitorio è stato impostato un dt pari a 0.005 s, come definito attraverso lo studio di time-convergence. In Figura 66 è riportato il rendering 3D relativo alla dispersione di metano dopo 1 s e in Tabella 29 invece è riportato il volume di metano, totale ed entro i limiti di infiammabilità, calcolato con il software Fluent-Ansys.

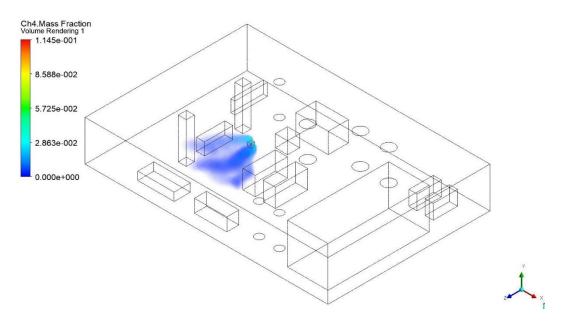


Figura 66 – Rilascio di metano a 1 s, scenario 3

Volume totale di metano rilasciato				
1.28E-1	m3			
Volume di metano entro i limiti di infiammabilità LFL-UFL				
5.47E-3 m3				
Volume di metano sopra il 10%di LFL				
1.13E-1 m3				

Tabella 29 -Volume di metano, caso transitorio a 1 s, scenario 3

Anche per lo scenario 3 è stata analizzata la variazione dei volumi di metano tra i vari timesteps ed in questo caso si raggiunge una condizione paragonabile al caso stazionario dopo circa 16 secondi di dispersione. Un tempo maggiore per il raggiungimento di tale condizione può essere dovuto al fatto che, per lo scenario 3, si ha un accumulo di inquinante maggiore rispetto agli scenari studiati in precedenza. In Figura 67 si può osservare la forma della nube a 16s e in Tabella 30 il volume calcolato attraverso il Software Fluent Ansys.

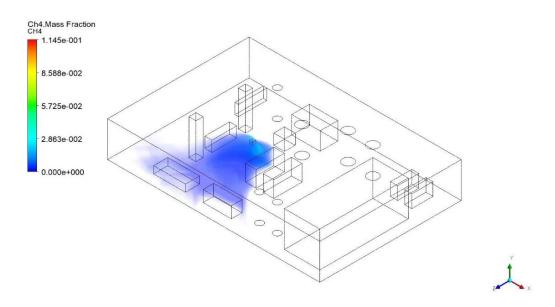


Figura 67 - Rilascio di metano a 16 s, scenario 3

Volume totale di metano rilasciato				
5.00E-1	5.00E-1 m3			
Volume di metano entro i limiti di infiammabilità LFL-UFL				
1.33E-3 m3				
Volume di metano sopra il 10%di LFL				
2.25E-1 m3				

Tabella 30 - Volume di metano, caso transitorio a 16 s, scenario 3

## 4.7.4 Comparazione degli scenari

Un primo confronto può essere fatto tra lo scenario 1 e lo scenario 2, dalla Tabella 24 si può notare come, rispetto allo scenario 1, il volume totale di metano rilasciato sia inferiore per il secondo scenario. Questo è dovuto alla posizione della source-box, in quanto nello scenario 2 è posizionata più vicino ad una boundary conditions di pressure outlet, a parità di direzione del vento proveniente da Nord-Ovest, è quindi favorita la dispersione dell'inquinante all'esterno della piattaforma. Di conseguenza la simulazione relativa allo scenario 2 raggiunge una condizione paragonabile allo stazionario a 9 secondi, piuttosto che a 11 secondi come per lo scenario 1. In Tabella 31 si riassumono i valori del volume di metano totale rilasciato per i tre scenari raggiunte le condizioni stazionarie, ricavati da Tabella 21, Tabella 24 e Tabella 28.

scenario	volume [m3]
1	3,56E-01
2	1,56E-01
3	5,07E-01

Tabella 31 - Confronto volume di metano rilasciato per i tre scenari (raggiunte le condizioni stazionarie)

L'influenza del vento può avere un effetto positivo per quelle posizioni della source-box in cui avvantaggia la dispersione dell'inquinante all'esterno dell'impianto, invece per altre posizioni può avere un effetto contrario, perché sposta la massa di sostanza pericolosa verso altre zone non inquinate aumentando così il rischio di incidente. Come nel caso dello scenario 1, Figura 68, in cui la nube di metano attraversa l'intera larghezza della piattaforma coinvolgendo numerosi ostacoli.

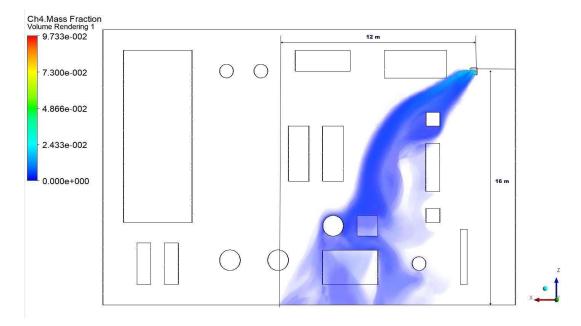


Figura 68 - Distanze raggiunte dalla nube in stato stazionario per lo scenario 1

Per lo scenario 3, nonostante la posizione della source-box sia analoga alla posizione dello scenario 2, si ha un accumulo maggiore di inquinante, come si può vedere dal valore del volume di metano riportato in Tabella 24 e in Tabella 28, per lo scenario 2 si ha un volume totale di metano rilasciato pari a 0,1556 m³ invece per lo scenario 3 si ha un volume di 0,5068 m³.

La differenza tra i due scenari consiste nella direzione di ingresso del vento, per lo scenario 2 si ha l'ingresso del vento dalla direzione Nord-Ovest. In Figura 69 sono riportati i valori di velocità del vento su un piano orizzontale posto a 1.5 m di altezza nel caso dello scenario 2. Si può notare come la velocità subisca una accelerazione in quelle posizioni in cui l'aria viene incanalata a seguito dell'impatto contro gli ostacoli, una velocità maggiore favorisce una più rapida diluizione dell'inquinante e nel caso dello scenario 2 favorisce il trasporto dell'inquinante all'esterno della piattaforma.

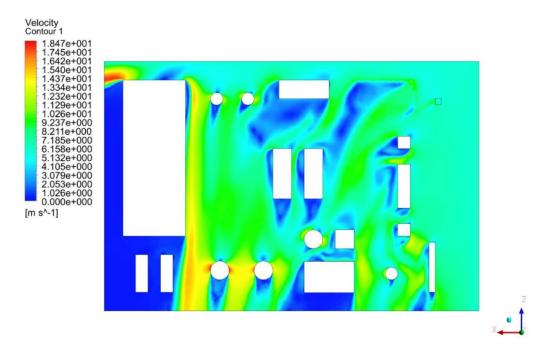


Figura 69 - Valori della velocità su un piano a 1.5 m

In Figura 70 sono riportati i valori di velocità del vento su un piano orizzontale posto a 1.5 m di altezza per lo scenario 3. In questo caso la direzione di ingresso del vento è quella proveniente da Sud-Est. Si può notare come la velocità del vento nella zona in cui è collocata la source-box, in questo caso, sia inferiore rispetto allo scenario 2, infatti in questa zona si ha un accumulo maggiore di metano come si può vedere confrontando la forma della nube in Figura 65 e in Figura 62.

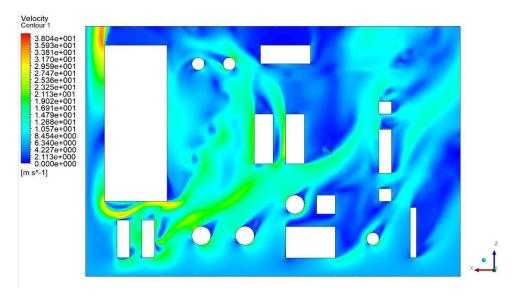


Figura 70 - Valori della velocità su un piano a 1.5 m

Dal confronto degli scenari 2 e 3 si evince l'importanza della completezza del set di scenari di rilascio da utilizzare allo scopo di ricavare le posizioni potenziali dei sensori, se si vuole assicurare una percentuale di copertura dei rilasci maggiore è necessario che il set di scenari sia quanto più rappresentativo dello spazio dei possibili eventi. In questo caso a

parità di posizione della source box, di condizioni e direzione di rilascio e intensità del vento, variando un solo parametro (direzione del vento) si ottiene per lo scenario 3 un volume di metano pari a circa tre volte quello dello scenario 2 e una netta differenza delle zone della piattaforma coinvolte. Lo scenario 2 interessa principalmente la pompa, il serbatoio e il rigeneratore di glicole, invece lo scenario 3 coinvolge il separatore, il serbatoio di olio secco, l'unità LACT, l'unità di trattamento olio e un pilastro.

#### CAPITOLO 5 – Modello di ottimizzazione della rete di sensori

In questo capitolo ci si propone di fornire una introduzione al modello di ottimizzazione che si è scelto di applicare per ottenere un posizionamento ottimizzato dei sensori fire&gas. È stata scelta una formulazione di programmazione lineare stocastica mista a numeri interi (MILP) proposta in [33] che definisce la funzione obiettivo come la sommatoria sul set completo di scenari simulati del prodotto tra la frequenza di accadimento per ciascuno scenario e un coefficiente di danno associato a ciascuno scenario incidentale in funzione della posizione dei sensori. In [33] gli scenari di rilascio sono considerati equiprobabili quindi la funzione obiettivo è semplificata e consiste nel minimizzare il tempo di rilevamento. Nel presente elaborato gli scenari di rilascio sono stati costruiti a partire dalle distribuzioni di probabilità delle singole variabili che li definiscono, dunque è possibile ricavare il valore di probabilità di occorrenza per ciascuno di essi. Inoltre l'ottimizzazione viene fatta considerando il volume totale di inquinante rilasciato dopo un certo tempo t, parametro ricavato sul software Fluent Ansys, in funzione delle diverse possibili posizioni ricavate per i sensori. La funzione obiettivo mira quindi a trovare le posizioni dei sensori che permettono di minimizzare il livello di rischio relativo al rilascio indesiderato di gas infiammabile.

Il problema di ottimizzazione è stato risolto attraverso l'Optimization Toolbox presente sul software Matlab. Il tempo necessario per risolvere il problema di ottimizzazione è piuttosto esiguo, dell'ordine di qualche secondo, il problema principale, da un punto di vista computazionale, rimane la grande quantità di scenari di rilascio da simulare per rappresentare adeguatamente lo spazio degli eventi, tenendo conto del fatto che ciascuna simulazione richiede ore, o giorni.

### 5.1 Formulazione teorica del problema

L'ottimizzazione è una branca della matematica che permette di ricavare il massimo e il minimo di una data funzione, detta "funzione obiettivo" che dipende dal problema in esame. È utilizzabile per problemi di tipo decisionale, infatti per poter risolvere questo tipo di algoritmi è necessario introdurre dei vincoli i quali permettono di trovare la soluzione dallo spazio degli eventi possibili. Per la formulazione matematica del problema è dunque necessario definire tre elementi:

- le variabili decisionali: cioè le variabili di cui si deve definire il valore ottimale, nel caso trattato sono le posizioni dei sensori che consentono di minimizzare il valore del rischio;
- la funzione obiettivo: cioè la relazione funzionale tra le variabili decisionali, e/o altre variabili di interesse, il cui valore deve essere massimizzato o minimizzato, nel caso trattato rappresenta il valore del rischio associato al rilascio di gas infiammabile;
- i vincoli: cioè le condizioni da rispettare che riducono l'insieme di tutte le soluzioni ammissibili ad un suo sottoinsieme. Nel caso in esame i vincoli imposti riguardano il numero massimo di sensori ammissibile e una condizione che assicura la copertura di ciascuno scenario incidentale.

La soluzione di un problema di ottimizzazione è rappresentata dal vettore di valori delle variabili decisionali, che appartiene all'insieme ammissibile, e che fornisce il valore massimo o minimo della funzione obiettivo.

A seguito di una revisione dei lavori presenti in letteratura riguardanti l'ottimizzazione delle reti di sensori è stato scelto di applicare una formulazione di programmazione lineare stocastica mista a numeri interi (MILP) proposta in [33]. Per MILP si intende una formulazione di ottimizzazione in cui sia la funzione obiettivo che i vincoli sono di tipo lineare, inoltre le variabili sono vincolate ad essere numeri interi.

Genericamente la funzione obiettivo, come riportato in [33], è definita in equazione {9}:

$$\min \sum_{a \in A} \alpha_a \sum_{i \in L} d_{a,i} x_{a,i}$$
 {9}

Dove:

- a rappresenta il singolo scenario e A il set completo di scenari simulati;
- i rappresenta la singola posizione di un gas detectors ed L è il set di posizioni candidate per i sensori.
- Il parametro  $\alpha_a$  rappresenta la probabilità correlata al singolo scenario a;
- $d_{a,i}$  è definito come il coefficiente di danno legato allo scenario a, nel caso in cui sia rilevato dal sensore nella posizione i; questo parametro è calcolato a priori per ciascuno scenario e per ciascuna posizione i.  $d_{a,i}$  può essere considerato come il tempo richiesto dal sensore nella posizione i per rilevare il rilascio simulato per lo scenario a, oppure può essere visto come il volume totale di inquinante rilasciato nello scenario a al tempo corrispondente di rilevazione del sensore nella posizione i. Le due grandezze sono correlate perché ad un minore tempo di rilevazione corrisponde un minore volume di inquinante rilasciato, e in entrambi i casi essendo il parametro  $d_{a,i}$  calcolato a priori ed è una variabile di ingresso dell'ottimizzazione la linearità del problema non viene compromessa.
- Inoltre è introdotta la variabile  $x_{a,i}$  necessaria per la formulazione del problema.  $x_{a,i}$  è una variabile booleana che ha valore 1 se il sensore nella posizione i è il primo a identificare lo scenario a, 0 in caso contrario.

Come detto in precedenza, in [33] ciascuno scenario è considerato egualmente probabile, questa ipotesi non riflette il rischio reale generato dai vari scenari di rilascio, infatti, la funzione obiettivo consiste nella minimizzazione del tempo di rilevamento per un dato set di scenari. Nel presente lavoro il set di scenari è stato costruito dalla definizione delle possibili sorgenti di rilascio, considerando la probabilità di rottura dei diversi componenti presenti nell'impianto, accoppiandola alle condizioni metereologiche, che non sono prevedibili e sono quindi state definite attraverso la distribuzione di frequenza di direzione e intensità del vento. Dunque la formula rappresenta una valutazione del rischio per cui si ricercano le posizioni dei sensori che rendono minimo il rischio associato al rilascio di gas infiammabile. Utilizzando la formulazione di

equazione {9} ma con un significato adattato di ciascun termine, come meglio descritto nel seguito, la funzione obiettivo per il caso studio in esame è dunque definita come segue:

$$\min R(U) = \min \sum_{a \in A} \alpha_a \sum_{i \in L} d_{a,i} x_{a,i}$$
 {10}

Come detto nel paragrafo 1.4 Analisi di rischio il rischio è dato dal prodotto della frequenza di accadimento di un evento e le sue conseguenze, infatti al secondo membro dell'equazione  $\{10\}$  compare il termine relativo alla frequenza di accadimento di ciascuno scenario,  $\alpha_a$ , e il coefficiente di danno  $d_{a,i}$ , inteso come il volume di inquinante con concentrazione maggiore o uguale a quella di interesse. La funzione obiettivo così definita non mira quindi a minimizzare il tempo di rilevamento, come in [33], ma il livello di rischio relativo al rilascio indesiderato di gas infiammabile.

Per risolvere il problema è necessario inserire i vincoli:

$$\sum_{i \in \mathcal{L}} s_i \le n \tag{11}$$

$$x_{a,i} \le s_i \tag{12}$$

$$\sum x_{a,i} = 1 \,\forall \, a \in A \tag{13}$$

$$s_i \in \{0,1\} \,\forall \, i \in \mathcal{L} \tag{14}$$

$$0 \le x_{a,i} \le 1 \,\forall a \in A \tag{15}$$

 $s_i$  è la variabile decisionale binaria che è pari a 0 se non esiste un sensore nella posizione i e pari a 1 se esiste un sensore nella posizione i; un primo vincolo tecnologico è dato dall'equazione  $\{11\}$  in cui si impone che il numero totale dei sensori  $s_i$  posizionati sia inferiore, o al massimo pari, al numero massimo di sensori consentito n. Per trovare un giusto compromesso tra i requisiti di sicurezza e il costo, il numero massimo di sensori da installare deve essere definito prima dell'ottimizzazione. L'equazione  $\{12\}$  impone che la posizione i sia la prima a rilevare lo scenario a tra tutte quelle posizioni che riescono a rilevare lo scenario a. L'equazione a0 sensore. Le equazioni a1 sia quanto impone che ciascuno scenario sia rilevato da almeno un sensore. Le equazioni a1 sia prima convergente.

# 5.2 Implementazione numerica

Per risolvere il problema è stato utilizzato il pacchetto software per l'ottimizzazione "Optimization Toolbox", il quale è un prodotto aggiuntivo di Matlab e fornisce una libreria di risolutori per diverse tipologie di problemi di ottimizzazione. Per la risoluzione di un problema di programmazione

lineare mista a numeri interi è disponibile la funzione "intlinprogr.m" [62], che è stata utilizzata per l'applicazione del modello matematico al presente caso studio.

I dati di input da inserire nel programma sono:

- A: il numero di scenari simulati;
- L: il numero di possibili posizioni per i sensori, cioè quelle ricavate dalle simulazioni;
- n: il numero massimo di sensori consentito;
- $\alpha_a$ : un vettore riga di lunghezza pari ad A, contenente la frequenza di accadimento per ciascuno scenario;
- $d_{a,i}$ : una matrice di A righe ed L colonne contenente i volumi della nube, calcolati ad un certo tempo t, per ciascuno scenario nel caso in cui sia rilevato dal sensore i.

## 5.2.1 Definizione dei parametri da inserire nel modello

A, L ed n sono valori costanti e sono definiti a priori dell'ottimizzazione. Il numero massimo di sensori n consentito dipende da diversi fattori quali i requisiti minimi di sicurezza da rispettare, la zonizzazione delle aree pericolose, che dipende dalle potenziali sorgenti di rilascio e le zone in cui si può avere un accumulo di sostanze pericolose, la tipologia di rilascio e di sostanza rilasciata e la ventilazione (forzata o naturale) presente nell'impianto. In generale il numero massimo di sensori è definito in modo da trovare un giusto compromesso tra la sicurezza e i costi. L è il numero di posizioni candidate per il posizionamento dei sensori. A è il numero di scenari simulati.

## 5.2.2 Frequenza di accadimento dei singoli scenari

La probabilità di accadimento di uno scenario è calcolata a partire dalla frequenza di rilascio e del campo di vento, a differenza di quanto assunto in [33], dove gli scenari sono considerati equiprobabili.

Nel presente caso studio gli scenari sono stati costruiti partendo dall'assunzione che le diverse variabili in gioco siano tra loro statisticamente indipendenti, dunque la frequenza globale dello scenario può essere ottenuta moltiplicando i singoli valori di frequenza, equazione {16}:

$$\alpha_{scenario} = \alpha_{rilascio\_foro} \cdot \alpha_{campo\ di\ vento}$$
 {16}

dove  $\alpha_{\text{rilascio\_foro}}$  rappresenta la frequenza di rilascio dal foro, individuata nel paragrafo 3.7 Diametro di rottura;  $\alpha_{\text{campo di vento}}$  rappresenta la probabilità relativa alla velocità e direzione del vento, definita nel paragrafo 3.9 Direzione e intensità del vento.

Di seguito sono riportati i valori ottenuti per gli scenari di rilascio simulati nel presente caso studio:

scenario	$lpha_{rilascio\_foro}$	$lpha_{direzione\ vento}$	$lpha_{velocit\`{ m a}}$ vento	Frequenza [eventi/anno]
1	0,0001287	0,165	0,0773	1,64E-06
2	0,0003294	0,165	0,0773	4,20E-06
3	0,0003294	0,171	0,0773	4,35E-06

Tabella 32 - Frequenze scenari di rilascio

#### 5.2.3 Coefficiente di danno

Per identificare il coefficiente di danno è necessario individuare per ciascuno scenario le posizioni candidate per il collocamento dei sensori.

Sono presenti diversi lavori in letteratura riguardo la scelta delle posizioni potenziali per i sensori da ottimizzare, ma non c'è una opinione comune o una indicazione generalizzata su come scegliere tali posizioni. Di seguito sono riportate alcune osservazioni conseguenti la lettura dei lavori bibliografici riguardanti l'ottimizzazione delle posizioni dei sensori fire&gas, [12],[13],[23],[25],[29], tali lavori sono stati utilizzati come supporto per il ragionamento di scelta delle posizioni da ottimizzare dalle simulazioni di dispersione.

In [25] tra i metodi per la scelta della posizione dei sensori è proposto quello riguardante il monitoraggio della sorgente, che consiste nel circondare ciascuna potenziale sorgente di rilascio con il proprio schema di sensori, una delle limitazioni di questo metodo è che potrebbe essere poco efficiente perché, nel caso di rilascio da una apparecchiatura in pressione, si ha la formazione di un getto supersonico con una sezione di dimensioni molto ridotte. In tal caso l'area che il sensore deve intercettare è esigua e al suo interno potrebbe non essere raggiunta la concentrazione di interesse, di conseguenza il rilevatore potrebbe non inviare l'allarme tempestivamente, poiché si rileva il gas con più ritardo.

Un posizionamento dei sensori basato sulla copertura della dispersione di inquinante può risultare più efficiente perché in una geometria congestionata e soggetta a ventilazione naturale rilevare un getto supersonico può risultare difficoltoso. Una nube, formata a seguito di un getto che interagisce con gli ostacoli e subisce il miscelamento con l'aria, avrà una sezione maggiore rispetto alla fase iniziale e una concentrazione minore e sarà più facilmente rilevabile. Nel caso di geometrie complesse per applicare questo metodo è necessario effettuare simulazioni CFD di dispersione.

Nel presente elaborato si è scelto di utilizzare il metodo che riguarda la copertura degli scenari di possibile rilascio [13]. Le posizioni possono essere individuate analizzando l'evoluzione della nube di infiammabile durante i diversi time-steps della simulazione di dispersione svolta in condizioni transitorie. I sensori, per un gas infiammabile, sono

solitamente settati per dare l'allarme quando rilevano delle concentrazioni pari o maggiori ad una frazione di LFL (solitamente il 10% di LFL), dunque una volta portate a termine le simulazioni di dispersione è possibile ricavare le posizioni candidate per i sensori integrando i concetti proposti dalle norme prescrittive. Tali posizioni rappresentano quelle in cui si raggiunge la concentrazione di interesse in un tempo sufficientemente breve tale da permettere l'attuazione delle azioni di sicurezza garantendo un livello di rischio accettabile.

Come descritto nel CAPITOLO 4, per le simulazioni di dispersione di inquinante sulla piattaforma è stato utilizzato il modello ibrido di "source-box" che prevede la separazione della fase di rilascio in cui si ha il getto supersonico e la fase di dispersione in cui il getto ha subito il miscelamento con l'aria e ha subito un rallentamento a seguito dell'impatto con l'ostacolo all'interno della source-box, quindi la nube simulata a valle della source-box rientra nelle condizioni in cui è agevolata la rilevazione da parte dei sensori.

Per la scelta dei potenziali punti di rilevazione è stata creato, sul software Fluent Ansys attraverso il comando "Isosurface", un volume di controllo i cui punti superficiali rappresentano la concentrazione di interesse e nei punti interni a tale superficie si avrà una concentrazione sicuramente pari o maggiore del 10% di LFL, in Figura 71 è rappresentato il volume di controllo individuato per lo scenario 1 ad 1 secondo di dispersione.

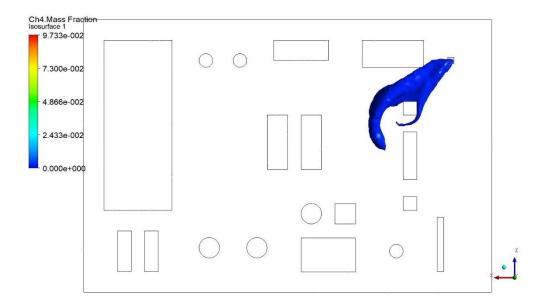


Figura 71 - Volume di controllo con concentrazione pari o maggiore al 10% di LFL per lo scenario 1 al tempo t=1 s

Per assicurare un tempo di rilevazione breve è stato considerato il volume rilasciato al primo secondo di dispersione, dato che già al tempo t=1 s la nube raggiunge una distanza dalla sorgente considerevole. Dato che la nube presenta una sezione stretta e quindi una

forma allungata sono stati scelti tre punti significativi per lo scenario 1 all'interno del volume mostrato in Figura 71.

Sono state esportate dal Software Fluent Ansys le coordinate relative alla posizione nello spazio della superficie che racchiude il volume di metano alla concentrazione di interesse al fine di identificare i possibili punti di monitoraggio i per lo scenario a al suo interno. È stato scelto un primo punto in prossimità della suorce-box, in cui viene raggiunta la concentrazione di interesse a dopo 0,1 s, tuttavia come spiegato in precedenza non sempre scegliere una posizione vicina al punto di rilascio rappresenta la soluzione migliore. Sono state selezionate quindi altre posizioni in grado di rilevare lo scenario 1, questo per garantire che, nel caso in cui nella posizione 1 non si possa fisicamente installare un sensore, si abbiano ancora a disposizione altre posizioni in grado di rilevare efficacemente lo scenario 1. È stato scelto un punto intermedio in cui la nube raggiunge un'altezza massima e la concentrazione di set-point si raggiunge dopo 0,5 s, perché la nube ha una distribuzione spaziale ed è bene installare i sensori a diversi livelli di altezza. Infine è stato individuato un terzo punto in prossimità della distanza massima raggiunta dalla nube in quanto questo consente ancora di rilevare lo scenario in un tempo breve ma non è banalmente la posizione più vicina al punto di rilascio. Secondo la metodologia prescrittiva per il monitoraggio della sorgente infatti, va calcolata la massima distanza raggiunta dalla nube ("set back distance"), alla concentrazione di interesse, questa distanza è la massima ammissibile per posizionare un sensore. Un sensore posto entro questa area entra in contatto con il gas, rilevando una concentrazione pari o maggiore al 10% di LFL e quindi sarà sicuramente in grado di fornire l'allarme per attivare le azioni di emergenza. Considerando la sezione verticale della nube, tutti e tre i punti sono stati scelti cautelativamente al centro della nube, perché in questo punto si ha una concentrazione maggiore rispetto alla zona più esterna in cui si verifica il miscelamento con l'aria. Inoltre essendo che i sensori, in base a quale tipologia si sceglie, hanno una certa copertura volumetrica non sono state investigate ulteriori posizioni per lo scenario 1. I punti individuati per lo scenario 1 sono riportati in Figura 72.

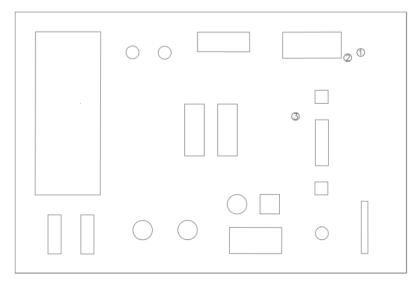


Figura 72 - Punti di monitoraggio individuati per lo scenario 1

A questo punto si ricava attraverso il Software Fluent Ansys il volume di inquinante rilasciato con concentrazione superiore al 10% di LFL nel caso in cui lo scenario 1 sia intercettato dai sensori in posizione 1, 2 e 3, queste quantità rappresentano il coefficiente di danno relativo allo scenario a=1 per le posizioni i=1,2,3.

Seguendo gli stessi ragionamenti di scelta delle posizioni per lo scenario 1, sono stati ricavati i punti di monitoraggio per gli scenari 2 e 3, cioè analizzando l'evoluzione della nube nel tempo. In Figura 73 è riportato il volume di inquinante con concentrazione maggiore o uguale al 10% di LFL per lo scenario 2 relativo al primo secondo di dispersione, utilizzato per ricavare le posizioni potenziali per i sensori.

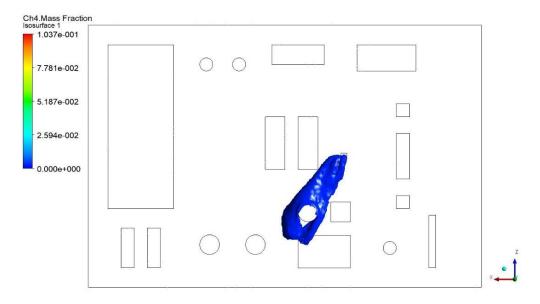


Figura 73- Volume di controllo con concentrazione pari o maggiore al 10% di LFL per lo scenario 2 al tempo t=1 s

Poiché la nube anche in questo caso presenta una forma allungata, come per lo scenario 1, sono state ricavate tre posizioni per il potenziale posizionamento dei sensori. Il primo punto è stato scelto in prossimità della source-box, in questo caso la nube si sviluppa inizialmente ad una altezza paragonabile a quella della source-box e in prossimità degli ostacoli subisce un innalzamento, dunque il secondo punto è stato scelto in prossimità dell'ostacolo, prima che si abbia una variazione di quota evidente, e il terzo punto, più lontano, a valle dell'ostacolo, dove si raggiunge l'altezza maggiore. I punti individuati per lo scenario 2 sono riportati in Figura 74.

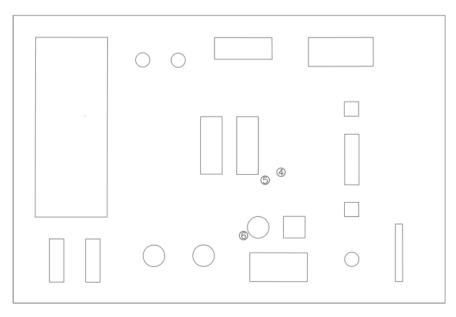


Figura 74 - Punti di monitoraggio individuati per lo scenario 2

In Figura 75 è riportato il volume di inquinante con concentrazione maggiore o uguale al 10% di LFL per lo scenario 3 relativo al primo secondo di dispersione, utilizzato per ricavare le posizioni potenziali per i sensori.

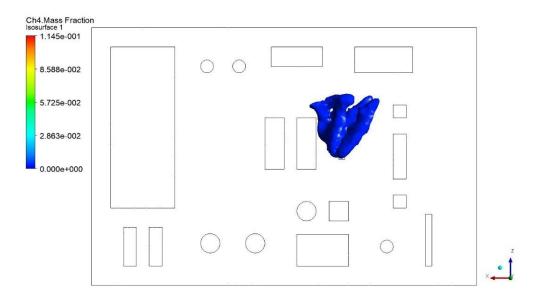


Figura 75 - Volume di controllo con concentrazione pari o maggiore al 10% di LFL per lo scenario 3 al tempo t=1 s

Nello scenario 3 la nube relativa alla dispersione di inquinante dopo un 1 secondo non presenta una forma allungata come per lo scenario 1 e 2, ma si ha una sezione della nube più larga, dunque per tenere conto di questa informazione sono state ricavate cinque diverse posizioni per il potenziale posizionamento dei sensori. Il primo punto è stato scelto in prossimità della sourcebox, il secondo e il terzo punti sono stati scelti in corrispondenza della sezione in cui la nube presenta una prima dilatazione evidente. In questa sezione si ha che nella parte inferiore della nube si hanno concentrazioni molto piccole di inquinante, dunque i due punti sono stati ricavati

nella zona più alta della nube. Successivamente sono state ricavate altre due posizioni in prossimità della zona più distante raggiunta dalla nube. I punti individuati per lo scenario 3 sono riportati in Figura 76.

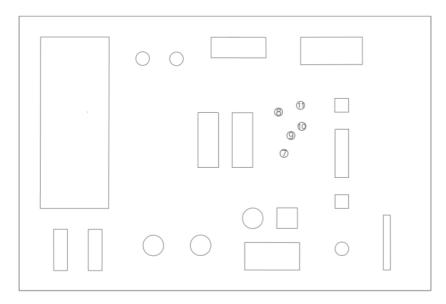


Figura 76 - Punti di monitoraggio individuati per lo scenario 3

In Tabella 33 sono riportate le coordinate spaziali delle posizioni individuate per i tre scenari, si ricorda che tali coordinate sono relative alla distanza dall'origine del sistema di riferimento del modello utilizzato, posto al centro della piattaforma ed alla quota della pavimentazione del deck; nelle ultime tre colonne della tabella è riportata una indicazione riguardo la capacità di ciascun sensore, nelle varie posizioni, di rilevare i tre scenari. Tali posizioni sono quelle da ottimizzare.

posizione	х	У	Z	scenario 1	scenario 2	scenario 3
1	-11,5	1,5	6,9	si	no	no
2	-10,5	2	6,5	si	no	no
3	-6,5	1,7	2	si	no	si
4	-3,6	2,6	-0,9	no	si	no
5	-2,5	2,8	-1,45	no	si	no
6	-1	3,2	-5,3	si	si	no
7	-4,3	3,1	0	si	si	si
8	-3,9	2,5	1,5	no	no	si
9	-4,8	1,3	1,5	si	no	si
10	-5,6	1,4	3,5	no	no	si
11	-5,5	3	1,5	si	no	si

Tabella 33 – Coordinate posizioni dei sensori

Non essendoci una indicazione generale nella scelta delle posizioni è comunque stata seguita una logica nella scelta delle posizioni dei sensori da ottimizzare. È bene sottolineare che questo

metodo empirico è stato proposto nel caso semplificato di tre scenari. Nel caso in cui si debbano analizzare 100 o 1000 scenari, la regola per la scelta dei punti dovrà essere rivista e generalizzata.

#### 5.3 Risultati

Dopo aver calcolato il valore di frequenza di accadimento per i diversi scenari, le conseguenze generate da ciascuno scenario e le posizioni potenziali per il posizionamento dei sensori a partire dalle simulazioni di dispersione, questi dati di input sono stati inseriti sul programma di ottimizzazione, realizzato sul software Matlab, per ottenere quelle posizioni che consentono di minimizzare il rischio correlato al sistema di rilevamento di gas. Sono stati imposti i vincoli descritti nel paragrafo 5.1 Formulazione teorica del problema, ed è stata calcolata la soluzione in funzione del numero massimo di sensori consentito. In Tabella 34 si riporta il valore di rischio ottenuto avendo imposto un numero massimo di sensori pari a 3 e le relative posizioni che hanno permesso di ottenere tale risultato.

Imponendo un numero massimo di sensori ammissibile pari a 3, si ottiene che le tre posizioni dei sensori che consentono di minimizzare la funzione obiettivo sono, ovviamente, quelle più vicine al punto di rilascio per ciascuno scenario, e sono riportate in Figura 77.

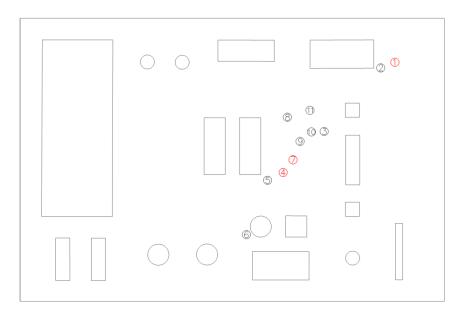


Figura 77 - Posizioni ottimizzate per n=3

n	posizione	R [m3/anno]
3	1 4 7	2,4436E-07

Tabella 34 - Risultato ottimizzato per n=3

Essendo il modello di ottimizzazione utilizzato per trovare un giusto compromesso tra il costo riguardante l'acquisto dei sensori e il livello di rischio legato al sistema di rilevamento fire&gas, è ragionevole fissare un numero massimo di sensori che sia almeno pari ad m-1, dove m è il numero di scenari incidentali analizzati. Dunque di seguito si riportano i risultati ottenuti imponendo un numero massimo di sensori ammissibile pari a 2 e ad 1.

In Tabella 35 è riportato il valore di rischio ottenuto imponendo n=2, le posizioni dei sensori che consentono di ottenere tale valore sono la posizione 1, che è quella in prossimità del punto di rilascio dello scenario 1 e la posizione 7, che rappresenta l'unica posizione comune per lo scenario 2 e lo scenario 3, e consente di rilevare questi ultimi in un tempo sufficientemente breve. In Figura 78 è riportato il layout di sensori ottenuto imponendo il numero massimo di sensori pari a 2.

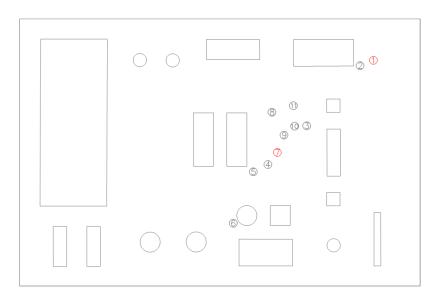


Figura 78 - Posizioni ottimizzate per n=2

n	posizione	R [m3/anno]
2	1 7	2,4485E-07

Tabella 35 - Risultato ottimizzato per n=2

In Tabella 36 è infine riportato il valore di rischio ottenuto imponendo n=1, e la posizione che consente di ottenere una soluzione nella ricerca del minimo della funzione obiettivo. Per il presente caso studio, la posizione 7 è l'unica che riesce ad intercettare le nubi relative a tutti e tre gli scenari, dunque il programma riesce a trovare una soluzione per il problema di ottimizzazione. Applicando il modello ad un numero maggiore di scenari di rilascio, potrebbe verificarsi il caso in cui diminuendo il numero massimo di sensori consentito, potrebbe non essere trovata una

soluzione ottimale. In Figura 79 è riportato il layout di sensori ottenuto imponendo il numero massimo di sensori pari a 1.

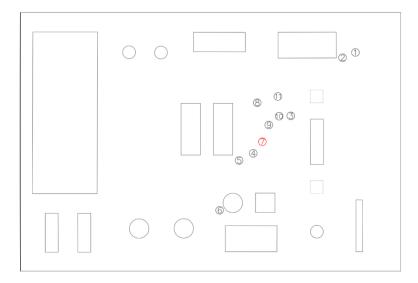


Figura 79 - Posizioni ottimizzate per n=1

n	posizione	R [m3/anno]
1	7	7,7481E-07

Tabella 36 - Risultato ottimizzato per n=1

In Figura 80 è messo a confronto il layout della piattaforma in cui è mostrato l'esempio con la griglia di punti di monitoraggio prestabilita, Figura 12, con il layout in cui sono riportate le posizioni dei punti di monitoraggio ricavate dalle simulazioni, in particolare il caso del risultato ottimizzato avendo imposto n=2, Figura 78.

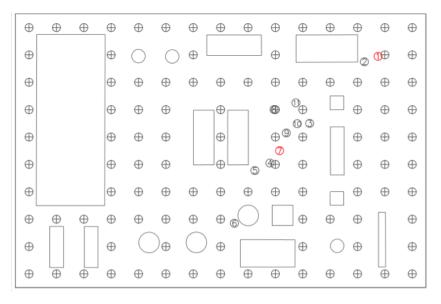


Figura 80 - Confronto griglia punti di monitoraggio prestabilita e posizionamento ricavato dalle simulazioni

Nel caso del punto di monitoraggio 8, individuato per lo scenario 3, questo si trova in corrispondenza di uno dei punti di monitoraggio della griglia, mentre le altre posizioni ricavate dalle simulazioni sono differenti da quelle prestabilite nel caso della griglia. Ciò che si vuole evidenziare è che, nel posizionamento ottimizzato per minimizzare il rischio, i sensori potrebbero essere installati in punti prossimi, ma differenti, da quelli prestabiliti della griglia. Anche se limitatamente al caso di soli tre scenari di rilascio, questa osservazione indica che, come detto in precedenza, utilizzando una griglia prestabilita per il posizionamento dei sensori non si assicura che ciascuno scenario sia rilevato, o nel caso in cui siano rilevati, non si assicura che le azioni di sicurezza siano attivate in un tempo sufficientemente breve.

Confrontando i tre valori del rischio ottenuti si ha che nel caso di n pari a 3 si raggiunge il livello di rischio più basso, questa rappresenterebbe la configurazione migliore, ma in un'ottica più ampia considerando molti scenari, sarebbe poco veritiero considerare un numero di sensori pari al numero di scenari. Ponendo il numero massimo consentito di sensori pari a 2 si ha un incremento del valore del rischio pari a circa il 2% del caso con n pari 3. Infine imponendo che ci possa essere solo un sensore per rilevare i tre scenari si ottiene un valore del rischio pari a circa tre volte il valore dei precedenti casi.

Bisogna tenere conto del fatto che, applicando il modello di ottimizzazione ad un set di scenari di rilascio più ampio, la scelta del numero massimo di sensori da installare deve essere effettuata nel rispetto dei requisiti minimi di sicurezza imposti e applicando i criteri di tollerabilità del rischio, oltre che nel rispetto del vincolo economico sul numero di sensori. L'accettabilità di un rischio generalmente non dipende solo dalle stime quantitative, dei valori di frequenza e danno, ma anche da fattori politici e sociali; sono considerati dunque diversi aspetti, quali la protezione delle persone e dell'ambiente, la percezione pubblica del rischio, la prudenza nel considerare le incertezze legate al fenomeno, questi sono tutti elementi che fanno parte della gestione del rischio. Solitamente è fissato un livello massimo di rischio accettabile, a seguito dell'analisi, il livello di rischio individuato deve essere minore di tale requisito.

Il modello di ottimizzazione proposto rappresenta in generale un metodo di supporto alla decisione del layout di sensori. L'ottimizzazione, da un punto di vista matematico, è utilizzata per trovare una soluzione, che rappresenta la configurazione dei sensori che fornisce il valore minimo del rischio associato al rilascio di idrocarburi nel rispetto dei vincoli imposti. D'altro canto l'informazione ottenuta sarà comunicata alle persone responsabili della gestione dell'impianto, che decideranno se i risultati del calcolo sono accettabili per raggiungere un livello di sicurezza atteso. Infatti, le persone responsabili l'impianto sono coloro che decideranno, nel rispetto della normativa in vigore, se investire una somma maggiore, installando un numero superiore di sensori, e assicurando un livello maggiore di sicurezza di quanto richiesto oppure spendere meno e assumersi la responsabilità delle eventuali conseguenze materiali, come ad esempio nel caso in cui la piattaforma non sia abitata e si avrebbero solo danni materiali, dove potrebbe essere accettato un livello di rischio più alto che nel caso del rischio per le persone.

### CAPITOLO 6 – Conclusioni e sviluppi futuri

Il lavoro di ricerca svolto è servito come studio preliminare di fattibilità per proporre una metodologia finalizzata a realizzare una rete ottimizzata di sensori fire&gas su una piattaforma oil&gas. L'applicazione di un metodo di ottimizzazione matematica rappresenta uno strumento di supporto durante la progettazione dei sistemi di sicurezza di un impianto di processo, dunque il risultato che si ottiene dal modello deve essere inserito in un'ottica più ampia nel rispetto dei requisiti di sicurezza da dover rispettare.

La prima fase del lavoro è stata un'analisi bibliografica dei lavori presenti in letteratura circa il posizionamento dei sensori attraverso un approccio basato sul rischio ed è stata definita la formulazione di programmazione lineare stocastica a numeri interi da implementare. La funzione obiettivo è basata sul concetto di rischio relativo alla capacità del sistema di sensori di rilevare eventuali rilasci di gas, dunque il layout ottimale per i sensori è quello che consente di ottenere un rischio minimo. Sono quindi stati definiti gli step intermedi per ricavare i parametri da inserire nel modello di ottimizzazione, cioè il valore di frequenza di accadimento dei possibili scenari incidentali, una quantificazione delle conseguenze derivanti da tali scenari e le possibili posizioni in cui collocare i sensori da ottimizzare.

In primo luogo è stato necessario definire un metodo per generare un set di scenari di potenziale rilascio accidentale di gas sulle piattaforme, che sia il più possibile in grado di coprire l'intero spazio degli eventi possibili. È stata effettuata una ricerca delle possibili cause di rilascio, e questa è stata il punto di partenza per la successiva analisi probabilistica dei diversi fattori che influenzano l'occorrere di un evento incidentale. Sono stati individuati i parametri di interesse per la costruzione del set di scenari: evento iniziatore, composizione del gas, punto di rilascio, pressione di rilascio, diametro rottura, direzione rilascio, velocità del vento, direzione del vento, temperatura ambiente, ed è stato creato un programma di simulazione Monte-Carlo, sul Software Matlab, per creare gli scenari di rilascio tenendo conto di come tali parametri interagiscano tra loro. La maggior parte degli studi esistenti e le pratiche del settore hanno generalmente considerato un insieme molto limitato di scenari di rilascio, ad esempio solamente quelli ad alto impatto. Come identificare in modo affidabile gli scenari di rilascio rimane una grande sfida, tuttavia il presente lavoro ci ha permesso di coprire parte delle incertezze legate alla costruzione degli scenari incidentali e di ottenere un set di scenari più completo rispetto a quanto presente in letteratura. Considerando lo stato di avanzamento generale del progetto, dunque il risultato ottenuto dalla generazione degli scenari è esaustivo, in futuro si può pensare di aggiungere un ulteriore parametro riguardante la presenza o l'assenza dell'ostacolo all'interno della source-box, e di conseguenza le dimensioni e la distanza dal punto di rilascio del cilindro.

La creazione degli scenari di rilascio ha consentito di ricavare due informazioni, cioè il valore di frequenza di accadimento di ciascuno scenario e i dati di input per le simulazioni di dispersione svolte nella successiva fase del lavoro.

Per lo studio della dispersione di gas in un ambiente con una geometria complessa e ostruita come quello delle piattaforme offshore è stato ritenuto opportuno utilizzare un codice di fluidodinamica computazionale, in particolare è stato utilizzato il Software Fluent Ansys. Questa analisi consente di ricavare le potenziali posizioni dei sensori da ottimizzare per ciascuno scenario e una stima delle conseguenze derivanti dal rilascio di gas in termini di volume di metano rilasciato fino al momento in cui ciascun sensore sia in grado di rilevare tale perdita. Inoltre per le simulazioni di dispersione è stato utilizzato il modello innovativo ibrido di "source-box", studiato nei lavori di ricerca svolti dai colleghi all'interno del laboratorio Seadog. Tale modello prevede la simulazione della prima fase di rilascio e della successiva fase di dispersione separatamente per ottenere buoni risultati in termini di valutazione dei fenomeni di dispersione. Dai risultati dei lavori precedenti è emerso che con tale modello si riducono i tempi computazionali richiesti rispetto al modello unico CFD. Con il presente lavoro si vuole proporre una applicazione del modello di source-box al fine di verificare che sia effettivamente un modello vantaggioso da utilizzare per la riduzione dei tempi in fase di progettazione della piattaforma, quando è necessario uno studio preliminare per la scelta delle misure di sicurezza.

Dal confronto, analizzato dal collega Moscatello in [21], tra l'utilizzo del modello di source-box e il modello utilizzato convenzionalmente, che considera in un'unica simulazione entrambe le fasi di rilascio e dispersione, è risultato che si ha una riduzione importante dei tempi di simulazione nel caso dell'approccio a due step. Nel presente caso studio con una sola source-box è stato possibile simulare tre diversi scenari incidentali, dunque è possibile applicare il modello di source-box ma è difficile trarre delle conclusioni più generali in termini di riduzione dei tempi computazionali. La simulazione della prima fase di rilascio, per la source-box utilizzata nel presente caso studio, ha comportato circa 4 ore di simulazione, si è ottenuta una riduzione di circa 8 ore di simulazione non dovendo svolgere la simulazione della prima fase di rilascio per ciascuno scenario di rilascio analizzato. L'approccio sembra incoraggiante ma per poterlo applicare ad un caso di molti scenari è necessaria la creazione di un catalogo di source-box a cui fare riferimento in funzione delle diverse condizioni di rilascio che possono verificarsi, in modo da poter utilizzare i risultati in termini di profili di concentrazione e velocità da usare come input per la simulazione della fase di dispersione.

Dalle simulazioni di dispersione effettuate in transitorio sono state quindi individuate le potenziali posizioni dei sensori da ottimizzare, seguendo un ragionamento sicuramente valido per i pochi scenari considerati, in futuro è opportuno generalizzare le considerazioni fatte per la scelta di tali posizioni in un'ottica di dover analizzare centinaia o migliaia di scenari di rilascio. Questo punto

rappresenta infatti una delle criticità maggiori della metodologia proposta, perché la scelta dei punti potenziali per il posizionamento dei sensori influenza l'affidabilità del sistema di protezione antincendio. Inoltre dalle simulazioni sono stati ricavati i valori per il coefficiente di danno da inserire nel modello di ottimizzazione per ciascuno scenario in funzione delle diverse posizioni individuate.

Infine è stato elaborato sul Software Matlab un programma in grado di implementare la formulazione matematica del modello di ottimizzazione proposta. Tale programma potrà essere utilizzato anche nel caso in cui saranno simulati molti più scenari rispetto al caso in esame. Sono stati quindi analizzati i risultati in termini di posizioni dei sensori e di rischio in funzione del numero massimo di sensori ammissibile. Da un lato, l'ottimizzazione matematica consente di trovare un risultato ottimale in termini di posizionamento dei sensori sul layout, dall'altro, il problema rientra in un contesto decisionale più generale in cui la scelta deve rispettare i criteri di accettabilità del rischio fissati per l'impianto. Nel caso studiato incrementando il numero di sensori massimo ammissibile da 1 a 2 si ha una riduzione del rischio di circa un terzo. Dagli output del modello si può dire che la metodologia proposta è applicabile e fornisce risultati realistici, ricordando che il presente lavoro di ricerca rappresenta un lavoro propedeutico per i futuri lavori che saranno svolti all'interno del Seadog in cui si prevede anche una fase di validazione del modello.

#### **APPENDICE I**

Il ciclo produttivo del petrolio è composto da diverse fasi:

- upstream: riguarda tutte le procedure allo scopo di ricavare il petrolio greggio dal sottosuolo; le principali sono: la ricerca del giacimento (esplorazione), la predisposizione di pozzi per il sollevamento del petrolio (perforazione), il processo di sollevamento del petrolio dal sottosuolo (estrazione), la fase di separazione della miscela di idrocarburi estratta dai pozzi costituita da una fase liquida, una gassosa e da impurezze solide;
- *midstream*: riguarda le procedure relative al trasporto del petrolio dal sito di estrazione al sito di raffinazione e lo stoccaggio del petrolio;
- *downstream*: riguarda i processi di trasformazione del petrolio (raffinazione) allo scopo di ottenere i prodotti derivati dal petrolio destinati al commercio e la loro distribuzione e vendita [63].

Inizialmente l'estrazione di idrocarburi era localizzata nei siti onshore, per la continua crescita della domanda di energia è sorta la necessità di ricercare nuovi giacimenti, così dalla fine degli anni Sessanta sono iniziati ad essere operativi gli impianti di produzione in mare. In Italia il primo impianto offshore di produzione è stato Ravenna Mare nel Mar Adriatico.

Le installazioni offshore si distinguono in funzione delle operazioni svolte[8]:

- piattaforme di produzione,
- piattaforme di supporto alla produzione,
- piattaforme non operative;

oppure in funzione della tipologia di struttura:

- piattaforme con struttura emersa,
- Teste di pozzo sottomarine.

Ci sono diverse tipologie di piattaforme offshore, ad esempio quelle fisse, cioè appoggiate al fondale marino, e quelle galleggianti, Figura 81. Il fattore che le distingue è la profondità d'acqua e le condizioni ambientali in cui devono lavorare gli impianti.

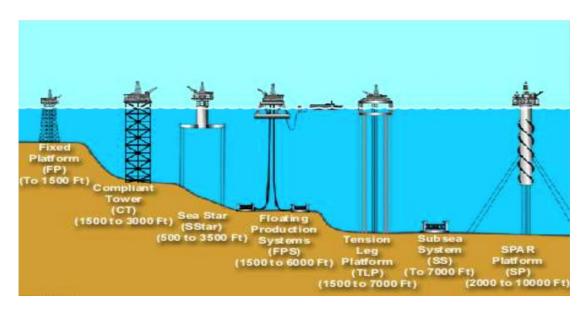


Figura 81- Tipologie di piattaforme di perforazione offshore [64].

Le piattaforme a **struttura fissa**, Figura 82, sono quelle utilizzate per fondali poco profondi, di norma al di sotto dei 200 m. Sono caratterizzate da una struttura di sostegno rigida con il compito di sostenere gli impianti di produzione, mantenendoli sopra una distanza minima di sicurezza tale da evitare le azioni del moto ondoso. La struttura di supporto è formata da un'alta sezione composta una struttura reticolare in acciaio ancorata direttamente sul fondale marino, ed è fissata nella parte superiore ad uno dei piani, chiamati deck, i quali sono sede dell'impianto di perforazione, dei sistemi per il trattamento degli idrocarburi, degli alloggi e tutti i restati sistemi ausiliari.



Figura 82 - Piattaforma offshore a struttura fissa.

Ci sono poi le **strutture a gravità**, Figura 83, utilizzate laddove è sconveniente utilizzare le strutture

in acciaio, ad esempio nel caso di fondali marini rocciosi molto irregolari. La stabilità di questo tipo di piattaforme è data dall'ingente peso delle stesse. È presente una base massiccia appoggiata sul fondo del mare, che sostiene delle grosse colonne in cemento armato che fungono da supporto per l'intera parte soprastante, detta topside [65].

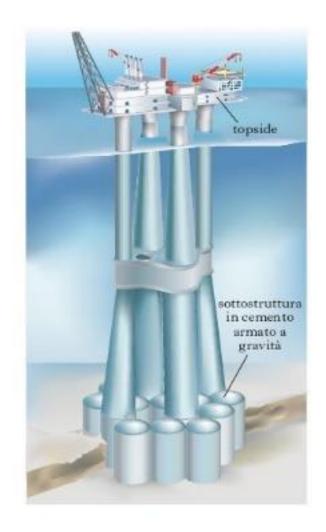


Figura 83 - Piattaforma con struttura a gravità [66]

Le **Compliant Tower (CT),** Figura 84, sono invece utilizzate per profondità del fondale marino comprese tra i 500 e i 900 m, per cui sarebbe difficoltoso fare affidamento a strutture fisse. Queste consistono in una torre stretta e flessibile, ancorata al fondale, in grado di supportare un deck convenzionale per le operazioni di perforazione e produzione. Differentemente della struttura fissa è in grado di flettersi e dunque a resistere a sforzi dovuti a carichi laterali.

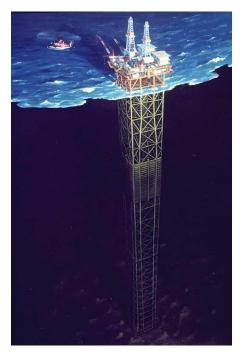


Figura 84 - Compliant Tower [67]

Oltre i 900 metri di profondità, ma non oltre i 1000, si utilizzano invece le "**Tension Leg Platforms**" (TLP),Figura 85. Si tratta di piattaforme galleggianti, perennemente ormeggiate per mezzo di catene e tiranti verticali ancorati al fondo marino. Ogni gruppo di catene è chiamato appunto "Tension Leg", è caratterizzato da una elevata rigidità assiale che assicura l'assenza di movimenti verticali.

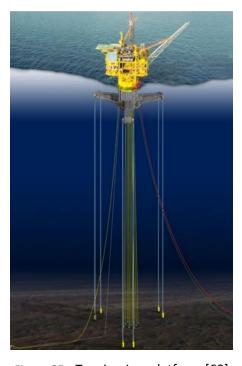


Figura 85 - Tension Leg platform [68]

In alternativa a queste tipologie di strutture offshore, vi sono le cosiddette piattaforme galleggianti, nel caso in cui il fondale marino risulta essere profondo tra i 1000 e i 3000 metri. Gli impianti offshore di produzione a struttura galleggiante sono tre:

**Piattaforma SPAR,** Figura 86: utilizzata tra i 1000 e i 2500 m, è composta da una struttura a torre cilindrica con diametro pari a 25 m e altezza compresa tra i 200 e i 250. Galleggia in posizione verticale grazie ad una opportuna disposizione in compartimenti stagni [69].

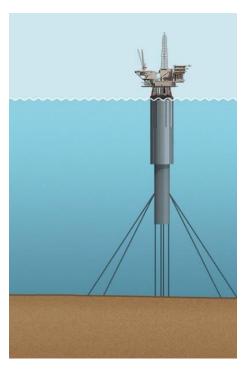


Figura 86 - Piattaforma SPAR [70]

**FPS** (Floating Production System), Figura 87: Sono unità di produzione semisommergibili per la perforazione dei pozzi e la produzione. Hanno una struttura analoga a quella dei mezzi di perforazione delle piattaforme fisse. Sono ormeggiate in posizione baricentrica rispetto ai pozzi, i prodotti vengono trasportati dalle teste di pozzo agli impianti in superficie attraverso tubazioni. Lo svantaggio maggiore di queste strutture consiste nel fatto di non avere capacità di stoccaggio [69].

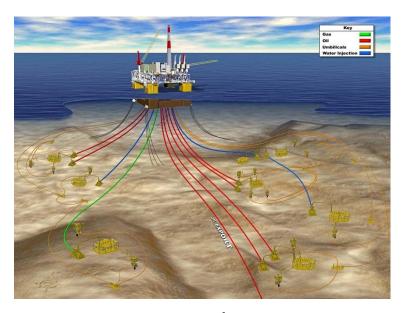


Figura 87 - Piattaforma FPS

**FPSO** (Floating Production Storage and Off-loading System), Figura 88: sono costituiti da uno scafo convenzionale dotato abbondanti stive in cui viene stoccato il greggio estratto attraverso i precedenti impianti. Una volta riempito il serbatoio, queste navi si dirigono verso la costa, dove scaricano negli impianti onshore il greggio estratto, che dunque sarà processato a terra e non offshore.

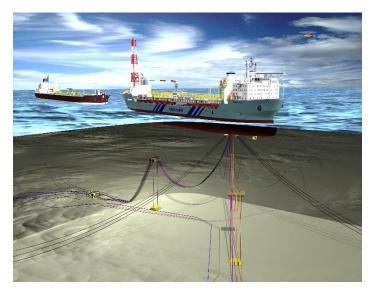


Figura 88 - Impianto FPSO [71]

Un aspetto strutturale delle piattaforme, di particolare interesse ai fini del presente elaborato, è la tipologia dei diversi Deck. I Deck sono aperti lateralmente e quindi sono sollecitati dal vento, si possono suddividere in due categorie, in funzione del tipo di pavimentazione che presentano. I deck "plated", Figura 89, cioè a pavimentazione solida, presentano una totale separazione dei piani, ciò significa che nel caso di dispersione di materiale pericoloso, questo rimane confinato

all'interno del deck. Solitamente questa tipologia è preferita nel caso in cui il fluido trattato è un gas, essendo geometricamente più semplice e non avendo il rischio di creare una pozza, come nel caso di liquido. Inoltre, nel caso di pavimentazione solida, si limita l'area coinvolta dalla nube di gas dispersa, diminuendo così le possibili sorgenti di innesco che potrebbero causare un incendio.

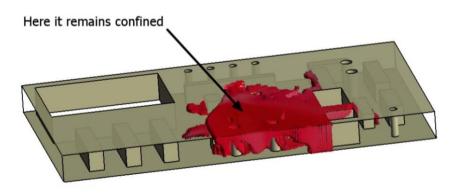


Figura 89 - Pavimentazione di tipo "plated" [72]

La seconda tipologia di deck è detta "grated", Figura 90, ed è costituita da una griglia metallica, è preferita nel caso in cui il fluido operativo sia liquido, per evitare, come detto, di formare una pozza che in caso di innesco potrebbe generare un "pool fire" (incendio da pozza).

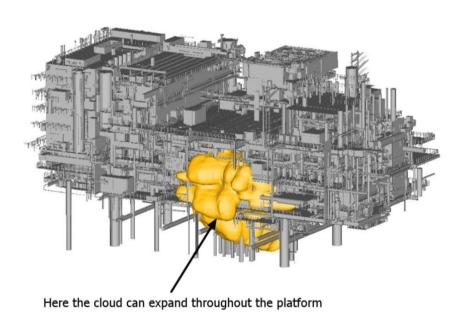


Figura 90 - Pavimentazione di tipo "grated" [72]

#### **APPENDICE II**

### CFD per l'analisi di Rischio

L'analisi delle conseguenze di una catena incidentale è uno strumento utilizzato per determinare il livello di danno per lo scenario e l'impatto sulle persone, le apparecchiature e l'ambiente circostante. La metodologia consiste nell'effettuare simulazioni, basate su adeguati modelli matematici, i quali permettono di stimare l'estensione dell'area di danno e quantificare i danni. Per quantificare i danni è necessario suddividerla in fenomeni elementari come ad esempio rilasci, incendi, dispersioni tossiche, e per ciascuno di essi utilizzare modelli di analisi adeguati, Figura 91.

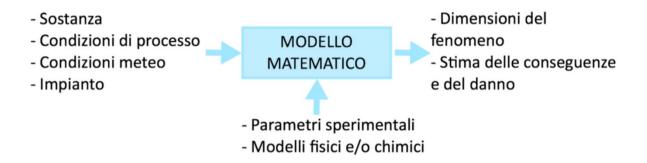


Figura 91 – Schema analisi delle conseguenze

I diversi modelli di simulazione sono suddivisi in funzione delle loro caratteristiche e alla loro complessità:

- Modelli semplici basati su tabelle ("Metodo speditivo DPCM 25/02/05", ShortCut ARPAT, ecc.), che danno risultati conservativi ("worst-case");
- Modelli parametrici (Yellow Book TNO (TNO The Netherlands Organization of Applied Scientific Research, 1996), Effects, Phast);
- Simulazioni con modelli CFD (Computational Fluid Dynamics);
- Esperimenti con modelli in scala.

La scelta del modello, semplice o più complesso, dipende da quale grado di dettaglio si vuole raggiungere per la definizione del danno, in generale in fase di design preliminare può essere sufficiente un modello tabellare, mentre in fase di "late design" un modello parametrico o una simulazione CFD sono più adeguati. Nel caso in esame per lo studio della dispersione di un gas in una geometria parecchio complessa e congestionata, è opportuno fare affidamento ai codici di fluidodinamica computazionale.

La *fluidodinamica computazionale* (Computational Fluid Dynamics, CFD) è una branca della meccanica dei fluidi che utilizza analisi numerica ed algoritmi per analizzare e risolvere problemi legati al movimento di fluidi in sistemi confinati o in campo aperto. [76].

In ambito industriale l'uso della CFD si basa sulla risoluzione del sistema di equazioni di Navier-Stokes, si tratta di equazioni differenziali non lineari alle differenze finite che non possono essere risolte analiticamente, pertanto si utilizzano algoritmi per soluzioni iterative. Il primo passo consiste nel definire la geometria che costituisce il dominio di calcolo, e suddividerlo in celle elementari. Successivamente si passa alla discretizzazione delle equazioni, cioè passare dalla forma differenziale ad un equivalente algebrico.

Nel presente elaborato i software utilizzati sono **Solidworks**, per la definizione della geometria e il **Ansys Fluent 18.2**, per la risoluzione delle equazioni fluidodinamiche.

Ogni simulazione CFD è costituita da tre fasi:

- Pre-processing: definizione della geometria, della mesh (griglia) e delle condizioni al contorno;
- Solving: scelta del modello di risoluzione e delle condizioni operative (stazionario o transitorio);
- Post-processing: analisi dei risultati.

Di seguito è riportata una descrizione delle diverse fasi.

#### PRE-PROCESSING

Durante questa fase viene costruita la geometria, il dominio computazionale, vengono definite le proprietà dei fluidi e dei fenomeni fisici coinvolti. Viene poi creata la mesh e definite le condizioni al contorno.

La mesh è una rappresentazione discreta della geometria coinvolta nel problema. Consiste nel suddividere in elementi su cui le equazioni possono essere approssimate, si passa dunque da un fenomeno continuo nello spazio ad un sistema definito su un numero limitato di punti.

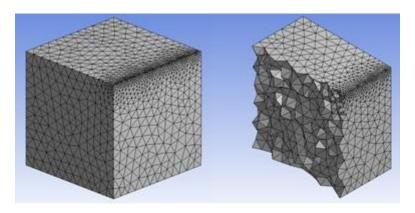


Figura 92 - Griglia computazionale

La scelta della mesh è molto importante perché influenza l'accuratezza della soluzione. Più è elevato il numero di celle più la soluzione è precisa, perché ci si avvicina allo spazio continuo; questo comporta un elevato costo computazionale. Dunque è necessario trovare un compromesso tra l'accuratezza e il costo computazionale, questo viene fatto mediante la grid indipendence, cioè la verifica dell'indipendenza della soluzione dalla dimensione della mesh.

#### **SOLVING**

Durante questa fase vengono scelte le sostanze coinvolte, le condizioni al contorno, le condizioni operative e i modelli da implementare. Si ha la risoluzione vera e propria delle equazioni, dopo averle discretizzate; il metodo di discretizzazione più utilizzato in CFD è il metodo dei volumi finiti, le equazioni differenziali alle derivate parziali vengono integrate in un volume di controllo, alle cui superfici vengono imposte le condizioni al contorno.

Le **condizioni al contorno** rappresentano il valore che le variabili devono assumere al contorno del dominio e sono necessarie per trovare una delle infinite possibili soluzioni. Le possibili condizioni al contorno sono:

- Velocity inlet: è imposta sulle superfici attraverso cui un fluido entra nel dominio, vengono specificati il modulo e la direzione della velocità;
- Mass flow Inlet: è imposta sulle superfici attraverso cui un fluido entra nel dominio, vengono specificate la portata della sostanza (o composizione della miscela) e direzione del flusso di massa;
- Pressure outlet: è imposta sulle superfici attraverso cui un fluido esce dal dominio, è specificato il valore della pressione in uscita;
- Wall: è imposta sulle superfici solide che non possono essere oltrepassate dal fluido;
- Symmetry: è utilizzata nel caso di simmetria, vengono imposte le componenti della velocità perpendicolari alla superficie;

• Internal: è imposta su quelle superfici che si trovano nel dominio di calcolo ma non hanno influiscono sulla fisica del problema;

Le equazioni di Navier-Stokes, come detto in precedenza, non possono essere risolte analiticamente salvo alcuni casi molto semplici, ad esempio nel caso di flussi laminari e geometrie piuttosto semplici. I fenomeni di interesse sono per lo più turbolenti. Un flusso turbolento, a differenza di un flusso laminare, presenta al suo interno strutture vorticose, che differiscono tra loro in grandezza e velocità, ciò rende il flusso non predicibile nel tempo poiché le piccole perturbazioni tendono ad intensificarsi e a far cambiare continuamente direzione al flusso. Nel moto turbolento le forze di inerzia sovrastano quelle viscose, ciò comporta un aumento di velocità e fluttuazioni delle pressioni che rendono il moto tridimensionale. I vortici sono la causa principale della miscelazione tra le specie presenti [77].

Per distinguere se un moto è laminare o turbolento si utilizza il numero di Reynolds, che è dato dalla formula:

$$Re = \frac{\rho \cdot \nu \cdot d}{\eta}$$

dove  $\rho\left[\frac{kg}{m^3}\right]$  è la densità del fluido,  $\nu\left[\frac{m}{s}\right]$  è la velocità, d[m] è la lunghezza caratteristica del fenomeno considerato ed  $\eta\left[\frac{kg}{m\cdot s}\right]$  è la viscosità dinamica del fluido. Tramite questo parametro adimensionale si può verificare se il moto del fluido, a seguito dell'impatto con un ostacolo è laminare o turbolento. Il valore di transizione da moto laminare a turbolento è  $Re=2\cdot 10^5$ .

Per risolvere le equazioni di Navier-Stokes applicate a casi reali è necessario adottare un approccio numerico, è quindi necessario scegliere anche il modello di risoluzione. Di seguito sono brevemente descritti i principali metodi [79].

Il modello **Direct Numerical Simulation (DNS)** rappresenta il modello più semplice. Simula i flussi turbolenti risolvendo le equazioni in maniera esplicita senza l'utilizzo di modelli di turbolenza, questo comporta una elevata accuratezza dei risultati perché si risolvono numericamente tutte le scale spaziali e temporali di turbolenza. Tuttavia, comporta un elevato costo computazionale ed economico poiché richiede l'utilizzo di una macchina molto performante. Il modello trova scarsa applicazione in ambito industriale ma è sfruttato nella ricerca.

Il modello Large Eddy Simulation (LES) risolve numericamente le strutture vorticose di dimensioni maggiori, scegliendo una dimensione caratteristica, mentre per la risoluzione delle strutture con dimensioni inferiori sono applicati i modelli di turbolenza. Il costo computazionale si riduce notevolmente rispetto al DNS ma è più elevato rispetto al seguente.

Il modello Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) risolve un sistema di equazioni alle derivate parziali semplificate, perché considera le grandezze istantanee (velocità e pressione) del flusso turbolento decomposte nella componente media e fluttuante nel tempo. Quest'ultimo modello ha un basso costo computazionale, ma perde in accuratezza rispetto ai modelli DNS e LES, inoltre è necessario applicare i modelli di turbolenza per la risoluzione del problema. Come validato in [79] il tempo di calcolo si riduce di circa un decimo utilizzando quest'ultimo modello rispetto agli altri due, infatti è il metodo più utilizzato in applicazioni come il caso studio del presente elaborato.

Vi sono differenti modelli di turbolenza *RANS*, [78], che sono disponibili in software commerciali CFD:

- Modello ad una equazione: si ha una equazione di trasporto in aggiunta alle equazioni di Navier-Stokes per la risoluzione del problema, per calcolare l'energia cinetica di turbolenza k;
- Modello a due equazioni: si hanno due equazioni di trasporto aggiuntive per calcolare l'energia cinetica turbolenta k e una seconda proprietà che in base al modello. Due tra i modelli più utilizzati in campo ingegneristico il k-ε dove ε è il rateo di dissipazione dell'energia cinetica turbolenta e il k-ω dove ω è il rateo di dissipazione specifica. Il modello k-ω al fine del presente elaborato risulta più adatto perché raggiunge una maggiore precisione per gli strati limite con gradienti di pressione [79], in particolare il modello k-ω SST che è un modello ibrido tra k-ε e k-ω, combina i vantaggi dei due, infatti nelle zone lontane dall'ostacolo si utilizza il k-ε e il k-ω nell'intorno dell'ostacolo.

#### POST-PROCESSING

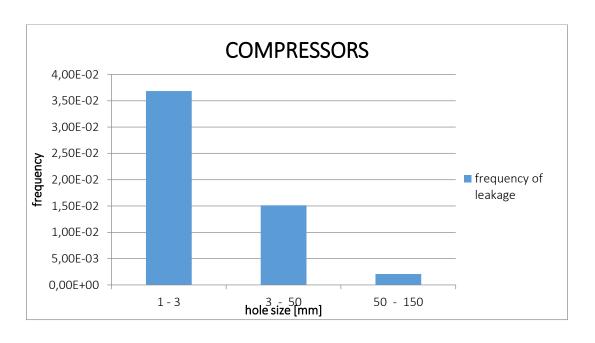
Il post-processing è effettuato dopo la risoluzione delle equazioni e permette di visualizzare e analizzare i risultati ottenuti, elaborando i dati in forma sia numerica che grafica.

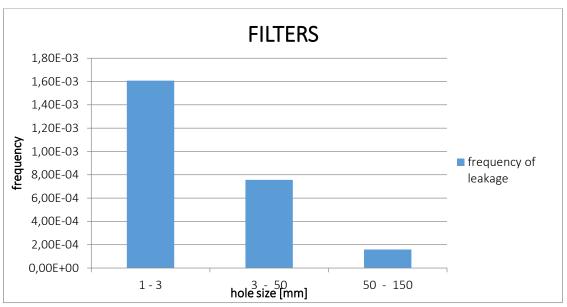
### ALLEGATO I

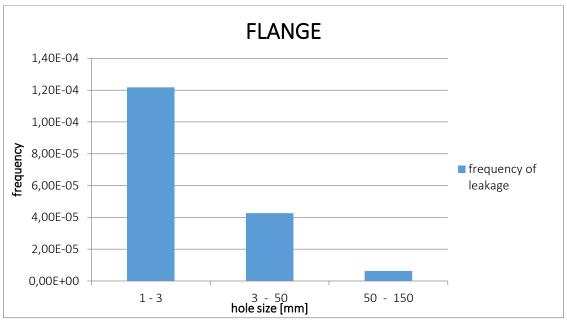
Tabella e grafici relativi alla frequenza di rilascio per ciascun componente

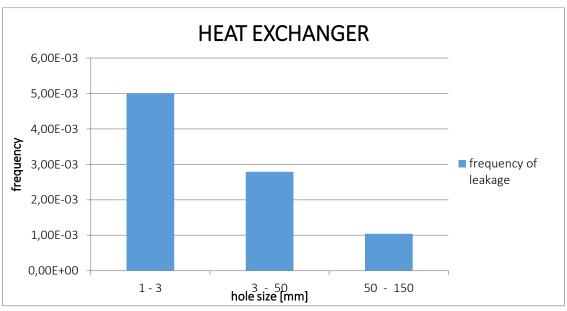
	COMPONENT						
	compressors filters flange heat pig trap process pum				pumps		
hole size [mm]	frequency of leakage [leakage/year]						
1 - 3	3,69E-02	1,61E-03	1,22E-04	5,01E-03	3,27E-03	9,41E-04	4,04E-03
3 - 50	1,51E-02	7,56E-04	4,26E-05	2,79E-03	1,59E-03	3,29E-04	1,81E-03
50 - 150	2,09E-03	1,60E-04	6,30E-06	1,04E-03	3,76E-04	6,10E-06	8,24E-04

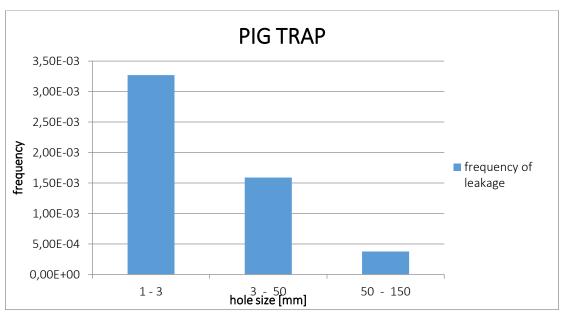
	COMPONENT			
	pumps	small bore fittings	valves	process vessel
hole size [mm]	frequency of leakage [leakage/year]			
1 - 3	4,04E-03	3,00E-04	6,80E-04	7,86E-04
3 - 50	1,81E-03	1,29E-04	1,96E-04	4,09E-04
50 - 150	8,24E-04	2,04E-05	1,90E-05	1,21E-04

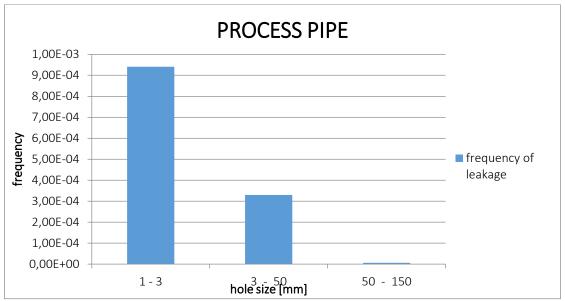


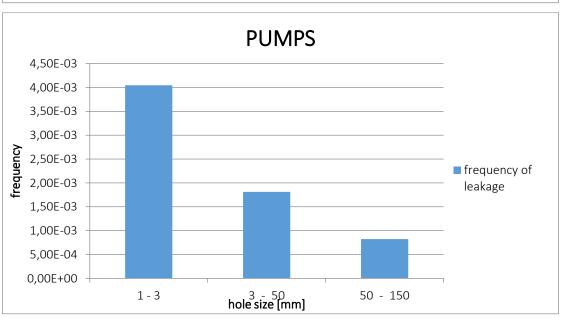


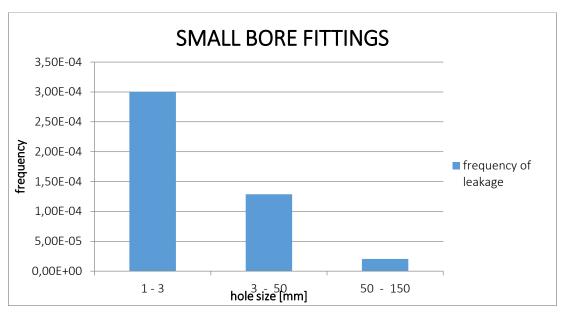


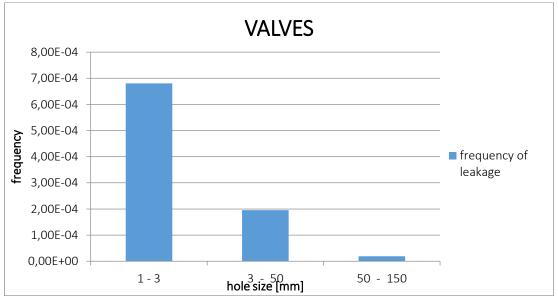


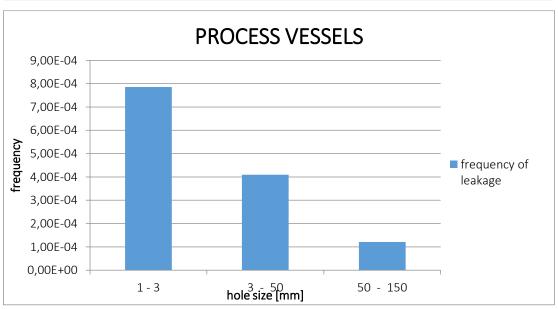












# ALLEGATO II

Tabelle singoli componenti e relative pressioni in [bar]

compressore	Р	componente
1	24	В
2	77	С

filtro	Р	componente
1	50	E
2	85	G
3	77	L
4	20	M
5	20	0
6	20	Р
7	20	Q

scambiatore	Р	componente
1	24	В
2	77	С
3	20	М
4	20	M

pig traps	Р	componente
1	50	1

tubazione	Р	componente
150	10	-

flangia	Р	componente
1	50	E
2	50	Е
3	50	Е
4	50	Е
5	50	Е
6	50	Е
7	50	G
8	50	G
9	77	L
10	77	L
11	20	М
12	20	М
13	20	N
14	20	N
15	20	0
16	20	0
17	20	Р
18	20	Р
19	20	Р
20	20	Р
21	20	Q
22	20	Q
23	20	Q
24	20	Q
25	50	R
26	50	R
27	50	S
28	50	S
29	50	T
30	50	T
31	77	U
32	77	U

pompa	Р	componente
1	50	E
2	20	M
3	20	N
4	20	Р
5	20	Q

raccordo	Р	componente
150	10	-

		1
serbatoio pressurizzato	Р	componente
1	24	В
2	77	С
3	77	D
4	50	E
5	77	L
6	20	M
7	20	M
8	20	0
9	50	Т
10	50	U

valvola	Р	componente
43	20	0
44	20	0
45	20	Р
46	20	Р
47	20	Q
48	20	Q
49	50	R
50	50	R
51	50	S
52	50	S
53	50	Т
54	50	Т
55	77	U
56	77	U

valvola	Р	componente
1	24	В
2	24	В
3	24	В
4	24	В
5	77	C
6	77	С
7	77	С
8	77	С
9	77	D
10	77	D
11	77	D
12	77	D
13	77	D
14	77	D
15	77	D
16	77	D
17	77	D
18	77	D
19	77	D
20	77	D
21	50	Е
22	50	Е
23	50	Е
24	50	Е
25	50	E
26	50	Е
27	50	G
28	50	G
29	77	L
30	77	L
31	20	M
32	20	M
33	20	M
34	20	M
35	20	M
36	20	M
37	20	M
38	20	M
39	20	M
40	20	M
41	20	N
42	20	N

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 - Consumo di energia primaria mondiale per tipologia di vettore energetico [1]	10
Figura 2 - Produzione di gas (miliardi di Sm3). Serie storica 1997 – 2017 [2]	13
Figura 3 - Cartografia alto Adriatico [3]	14
Figura 4 - Cartografia Mare Ionio e Canale di Sicilia [3]	14
Figura 5 - Sversamento di idrocarburi nel Golfo del Messico, incidente Deepwater Horizon	15
Figura 6 - Step analisi di rischio [11]	21
Figura 7 - Matrice di rischio	22
Figura 8 - Triangolo degli incendi [14]	24
Figura 9 - Limiti di infiammabilità	24
Figura 10 – Barriere di sicurezza	27
Figura 11 - Percentuale rilasci di idrocarburi non rilevate (rapporto dell'HSE [13])	31
Figura 12 – Esempio griglia punti di monitoraggio prestabilita	34
Figura 13 - Esempio punti potenziali per i sensori ricavati dalle simulazioni CFD	35
Figura 14 - Esempio rete ottimizzata di sensori	35
Figura 15 - Struttura del lavoro	36
Figura 16 - Layout deck di produzione	
Figura 17 - Numero di rilasci di idrocarburi > 0,1 kg/s [38]	41
Figura 18 – Confronto tra le compagnie petrolifere Inglesi e Norvegesi [40]	43
Figura 19 –Pittogrammi di pericolo CH4 [47]	45
Figura 20 –Frequenze di rilascio compressore centrifugo	48
Figura 21 –Frequenza di rilascio semplificata compressore	49
Figura 22 - Distribuzione frequenza di rilascio moltiplicata per il numero di componenti	
Figura 23- Funzione cumulata per i componenti	53
Figura 24 – Orientamento piattaforma	56
Figura 25 - Direzione di rilascio	57
Figura 26 – Posizione piattaforme nel mare Adriatico e intensità del vento [54]	57
Figura 27 - Distribuzione di frequenza circolare per l'intensità del vento	58
Figura 28 - Criterio di scelta per la distribuzione di frequenza delle direzioni del vento	59
Figura 29 - Distribuzione di frequenza per le 8 direzioni di interesse	60
Figura 30 – Distribuzione di Weibull	
Figura 31 - Approcci per la modellizzazione di un rilascio di gas in pressione [72]	65
Figura 32 - Schema approccio a due steps con i modello di source-box [19]	
Figura 33 - Rilascio da una tubazione	67
Figura 34 – Dominio della source-box	68
Figura 35 – Posizionamento della source-box sul deck	
Figura 36 - Output simulazione di rilascio	
Figura 37 - Profilo di concentrazione importato sulle facce della source-box	70
Figura 38 - Area di lavoro sul software Fluent Ansys	
Figura 39 - Fluent Launcher	72
Figura 40 – Geometria della piattaforma e sistema di riferimento	73
Figura 41 - Modello 3D piattaforma	73

Figura 42 – Opzioni Mesh	74
Figura 43 – Mesh dominio di calcolo	75
Figura 44- Dettaglio mesh ostacoli e inflation layer	75
Figura 45 –Posizione 1 source-box	76
Figura 46 - Posizione 2 source-box	77
Figura 47 - Posizione dei piani per la grid independence	78
Figura 48 – Grid independence piani 1, 2, 3 e 4	78
Figura 49 - Grid independence piani 5, 6, 7 e 8	79
Figura 50 – Velocity Inlet	80
Figura 51 - Pressure Outlet	80
Figura 52 - Velocity Inlet Source-box	81
Figura 53 – Impostazioni per il calcolo	81
Figura 54 - Time convergence	83
Figura 55 –Geometria scenario 1	85
Figura 56 - Rendering 3D dispersione metano scenario 1 (caso stazionario)	86
Figura 57 - Volume di metano rilasciato entro i limiti di infiammabilità raggiunte le	condizioni
stazionariestazionarie	86
Figura 58 - Simulazione di un getto libero di metano sul Software DNV Phast	87
Figura 59 - Rilascio di metano a 1 s, scenario 1	88
Figura 60 - Rilascio di metano a 11 s, scenario 1	88
Figura 61 – Geometria scenario 2	89
Figura 62 - Rendering 3D dispersione metano scenario 2 (caso stazionario)	90
Figura 63 - Rilascio di metano a 1 s, scenario 2	91
Figura 64 - Rilascio di metano a 9 s, scenario 2	92
Figura 65 - Rendering 3D dispersione di metano scenario 3 (caso stazionario)	93
Figura 66 – Rilascio di metano a 1 s, scenario 3	94
Figura 67 - Rilascio di metano a 16 s, scenario 3	95
Figura 68 - Distanze raggiunte dalla nube in stato stazionario per lo scenario 1	96
Figura 69 - Valori della velocità su un piano a 1.5 m	97
Figura 70 - Valori della velocità su un piano a 1.5 m	97
Figura 71 - Volume di controllo con concentrazione pari o maggiore al 10% di LFL per l	o scenario
1 al tempo t=1 s	104
Figura 72 - Punti di monitoraggio individuati per lo scenario 1	105
Figura 73- Volume di controllo con concentrazione pari o maggiore al 10% di LFL per lo	
al tempo t=1 s	106
Figura 74 - Punti di monitoraggio individuati per lo scenario 2	107
Figura 75 - Volume di controllo con concentrazione pari o maggiore al 10% di LFL per l	
3 al tempo t=1 s	107
Figura 76 - Punti di monitoraggio individuati per lo scenario 3	108
Figura 77 - Posizioni ottimizzate per n=3	109
Figura 78 - Posizioni ottimizzate per n=2	110
Figura 79 - Posizioni ottimizzate per n=1	111

Figura 80 - Confronto griglia punti di monitoraggio prestabilita e posizionamento rica	avato dalle
simulazioni	111
Figura 81- Tipologie di piattaforme di perforazione offshore [64]	117
Figura 82 - Piattaforma offshore a struttura fissa	117
Figura 83 - Piattaforma con struttura a gravità [66]	118
Figura 84 - Compliant Tower [67]	119
Figura 85 - Tension Leg platform [68]	119
Figura 86 - Piattaforma SPAR [70]	120
Figura 87 - Piattaforma FPS	121
Figura 88 - Impianto FPSO [71]	121
Figura 89 - Pavimentazione di tipo "plated" [72]	122
Figura 90 - Pavimentazione di tipo "grated" [72]	122
Figura 91 – Schema analisi delle conseguenze	123
Figura 92 – Griglia computazionale	125

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 - Legenda componenti	38
Tabella 2 - Proprietà del metano	45
Tabella 3 - Frequenze di rilascio compressore centrifugo	47
Tabella 4 – Frequenza di rilascio compressore centrifugo	48
Tabella 5 - Frequenza di rilascio compressore alternativo	48
Tabella 6 – Selezione tipologia compressore con frequenza più elevata	49
Tabella 7 – Definizione componenti	51
Tabella 8 - Numero totale per ciascuna tipologia di componente	52
Tabella 9 - Definizione scenari di rilascio	54
Tabella 10 - Gradi Azimut	58
Tabella 11 - Cumulata distribuzione di frequenza per l'intensità del vento	59
Tabella 12 - Valori di temperatura utilizzati per le simulazioni	62
Tabella 13 - Volume di metano rilasciato alle diverse temperature	62
. Tabella 14 - Valori di concentrazione e velocità sui diversi piani al variare della Temperatura	63
Tabella 15 - Condizioni iniziali di potenziali scenari di rilascio	64
Tabella 16 – Dimensioni piattaforma	73
Tabella 17 - Valori element size per la grid independence	76
Tabella 18 - Massimo time-step consentito in funzione della velocità del vento	82
Tabella 19 - Scenari di rilascio scelti per la simulazione	84
Tabella 20 - Tabella riassuntiva parametri di input scenario 1	85
Tabella 21- Volume di metano, caso stazionario, scenario 1	86
Tabella 22 - Volume di metano a 11 s	89
Tabella 23- Tabella riassuntiva parametri di input scenario 2	90
Tabella 24 - Volume di metano, caso stazionario, scenario 2	90
Tabella 25 - Volume di metano, caso transitorio a 1 s, scenario 2	91
Tabella 26 - Volume di metano, caso transitorio a 9 s, scenario 2	92
Tabella 27 - Tabella riassuntiva parametri di input scenario 3	92
Tabella 28 - Volume di metano, caso stazionario, scenario 3	93
Tabella 29 -Volume di metano, caso transitorio a 1 s, scenario 3	94
Tabella 30 - Volume di metano, caso transitorio a 16 s, scenario 3	95
Tabella 31 - Confronto volume di metano rilasciato per i tre scenari (raggiunte le condi	izioni
stazionarie)	96
Tabella 32 - Frequenze scenari di rilascio	103
Tabella 33 – Coordinate posizioni dei sensori	108
Tabella 34 - Risultato ottimizzato per n=3	109
Tabella 35 - Risultato ottimizzato per n=2	110
Tabella 36 - Risultato ottimizzato per n=1	111

#### **BIBLIOGRAFIA**

- [1] IEA, Key World Energy Statistics 2017, Paris, 2017.
- [2] Rapporto Annuale 2018 DGRME. http://unmig.sviluppoeconomico.gov.it/unmig/stat/ra2018/it/ra2018.pdf
- [3] http://unmig.mise.gov.it/unmig/strutturemarine/elenco.asp
- [4] Espen Olsen, S. N. (2015). *Exploring relationships between organizational factors and hydrocarbon leaks on offshore platform*. Safety Science 80 (2015) 301–309.
- [5] D. Lgs. 26 giugno 2015, n. 105 art.3 comma o). (s.d.). Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose. (15G00121).
- [6] http://www.ptil.no/framework-hse/category403.html#\_Toc438218425
- [7] DIRETTIVA 2013/30/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 12 giugno 2013 sulla sicurezza delle operazioni in mare nel settore degli idrocarburi e che modifica la direttiva 2004/35/CE
- [8] http://unmig.mise.gov.it/unmig/internazionale/direttiva.asp
- [9] DECRETO LEGISLATIVO 18 agosto 2015, n. 145. Attuazione della direttiva 2013/30/UE sulla sicurezza delle operazioni in mare nel settore degli idrocarburi e che modifica la direttiva 2004/35/CE. (15G00159)
- [10] Cocuzza, M., Scaltrito, L., Ferrero, S., Marasso, S.L., Tommasi, A., Perrone, D. e Pirri, C.F. (2016) "Stato dell'arte e prospettive di innovazione nel monitoraggio ambientale, fire&gas per impianti offshore"
- [11] A. Carpignano, "Risk Analysis Booklet".
- [12] K. Cen, et al., "A risk-based methodology for the optimal placement of hazardous gas detectors", Chin. J. Chem. Eng. (2017), https://doi.org/10.1016/j.cjche.2017.10.031.
- [13] HSE, Fire and Explosion Guidance: Part 1: Avoidance and Mitigation of Explosions, 2003.
- [14] https://www.chimica-online.it/download/triangolo-del-fuoco.htm.
- [15] D.L. Ma, J.Q. Deng, Z.X. Zhang, "Comparison and improvements of optimization methods for gas emission source identification", Atmos. Environ. 81 (2013) 188–198.
- [16] "Facilities Regulations" (PSA,2017) http://www.ptil.no/facilities/category400.html#\_Toc501376086
- [17] N. Bono, "Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti Oil&gas offshore", 2018, Politecnico di Torino
- [18] A. Tortora, "Progettazione di un laboratorio sperimentale per lo studio della dispersione di inquinanti in piattaforme Oil&Gas supportata da modellazione CFD", 2018, Politecnico di Torino
- [19] C. Rupolo, "Modellizzazione CFD del rilascio di gas compressi in ambiente off-shore: source boxes", 2018, Politecnico di Torino
- [20] E. Carrozza, "Modellazione CFD per lo studio di rilasci e dispersione atmosferica di inquinanti in piattaforme Oil&Gas", 2018, Politecnico di Torino
- [21] A. Moscatello, "Modellazione CFD di rilasci incidentali di gas infiammabili e tossici in piattaforme Oil&Gas", 2018, Politecnico di Torino
- [22] ISO 73/2002, Risk management -- Vocabulary -- Guidelines for use in standards, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2002.
- [23] J. A. Bafjord, "Positioning of gas detectors at offshore installations". 2011, University of Stavanger.

- [24] CEI EN 60079-29-2, 2009/01, "Atmosfere esplosive. Parte 29-2: Rilevatori di gas infiammabili- Scelta, installazione, uso e manutenzione dei rilevatori di gas infiammabili e ossigeno".
- [25] "Continuous Monitoring for Hazardous Material Release". (2009) CCPS, AIHA.
- [26] API, API Recommended Practice 14C: "Recommended Practice for Analysis, Design, Installation, and Testing of Basic Surface Safety Systems for Offshore Production Platforms" (2007)
- [27] SA, ANSI/ISA-RP 12.13.01 (IEC 61779–6 Mod): "Recommended Practice for the Installation, Operation, and Maintenance of Combustible Gas Detection Instruments" (2003)
- [28] ISA-TR84.00.07. "Performance-based Fire and Gas Systems Engineering Handbook", (2010)
- [29] DeFriend, S., Dejmek, M., Porter, L., Deshotels, B., & Natvig, B. (2008). "A risk-based approach to flammable gas detector spacing". Journal of Hazardous Materials, 159, 142–151.
- [30] Lee, R., & Kulesz, J. (2008). "A risk-based sensor placement methodology. Journal of Hazardous Materials" 158, 417–429.
- [31] Strøm, Ø. & Bakke, J. (1999). "Gas detector location. Safety on offshore installations". ERA Technology Ltd, UK.
- [32] V.R. Richart, D.O. Christian, Q.P. Efraín, M. Sama. "CFD-based approach for gas detectors allocation", J. Loss Prev. Process, 44 (2016), pp. 633-641
- [33] S. Legg, A. Benavides-Serrano, J. Siirola, J. Waston, S. Davis, "A stochastic programming approach for gas detector placement using CFD-based dispersion simulations", Comput. Chem. Eng. 47 (2012) 194–201.
- [34] Guidelines regarding the management regulations CHAPTER IX http://www.ptil.no/management/category406.html# Toc501377259
- [35] GUIDELINES REGARDING THE MANAGEMENT REGULATIONS CHAPTER VIII http://www.ptil.no/management/category406.html#\_Toc501377259
- [36] Koteswara Reddy, K. Y. (2016). Analysis of Accidents in Chemical Process Industries in the period 1998-2015. International Journal of ChemTech Research CODEN (USA): IJCRGG ISSN: 0974-4290 Vol.9, No.04 pp 177-191
- [37] http://www.hse.gov.uk/offshore/statistics.htm
- [38] http://www.psa.no/getfile.php/1344338/PDF/RNNP%202016/ENG\_summary\_RNNP201 6.pdf
- [39] Hydrocarbon leaks and fire Petroleum Safety Authority Norway
- [40] Vinnem (2010) Analysis of root causes oj major hazard precursors (hydrocarbon leaks) in Norwegian offshore petroleum industry. Reliability Engineering and System Safety 95 (2010) 1142-1153
- [41] Vinnem (2012) On the analysis of hydrocarbon leaks in the Norwegian offshore industry. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 25 (2012) 709-717
- [42] Vinnem (2015) Root causes of hydrocarbon leaks on offshore petroleum installations. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 36 (2015) 54-62
- [43] D.Lgs. 26 giugno 2015, n°105, Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose.
- [44] Sklet, S. (2006). Hydrocarbon releases on oil and gas production platforms: Release scenarios and safety barriers. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*.
- [45] DNV failure frequency guidance v2

- [46] OGP, Risk Assessment Data Directory, Report No.434-1, March 2010, Process Release Frequency.
- [47] REGOLAMENTO (CE) N. 1272/2008, relativo alla classificazione, all'etichettatura e all'imballaggio delle sostanze e delle miscele
- [48] Malvin A. Kalos, Paula A. Whitlock, Monte Carlo methods, WILEY-WCH, 2008
- [49] http://www.hse.gov.uk/offshore/statistics.htm
- [50] Falck, A., Bain, B., & Rødsætre, L. (2009) Leak frequency modelling of offshore QRA based on the Hydrocarbon Release Database, Hazards XXI Conference, IChemE, Nov. 2009.
- [51] https://www.cfd-online.com/Wiki/Courant–Friedrichs–Lewy\_condition
- [52] http://www.eteasicurezza.it/dati/pagine/consequence\_analysis\_02%20Rilasci.pdf
- [53] www.va.minambiente.it/File/Documento/143987
- [54] http://map.rse-web.it/tritone/map.phtml
- [55] N. A. B. Kamisan, A. G. Hussin\*, Y. Z. Zubairi and S. F. Hassan "Distribution of wind direction recorded at maximum wind speed: A case study of Malaysian wind data for 2005" International Journal of the Physical Sciences Vol. 6(7), pp. 1840-1850, 2011
- [56] www.wind-power-program.com/wind\_statistics.htm
- [57] http://www.mareografico.it/?session=0S331837824081OR6567D7387&syslng=ita&sysmen=-1&sysind=-1&sysfnt=0&code=STAZ&idst=15
- [58] J.V. Seguro \* , T.W. Lambert, "Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis"
- [59] Seyit A. Akdag, Ali Dinler, "A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications"
- [60] L. K. a. M. D. K. Stephens M. J., «"A model for sizing high consequence areas associated with natural gas pipelines",» in *Stephens M. J., Leewis K. and Moore D. K.. A model for sizing high consequence areas a 4th International Pipeline Conference*, 2002.
- [61] DNV GL Phast (Process hazard analysis software)
- [62] https://it.mathworks.com/help/optim/ug/mixed-integer-linear-programming-algorithms.html
- [63] https://it.wikipedia.org/wiki/Petrolio
- [64] "Fundamental behaviour of offshore platform steel decks under running pool fires" Emanuel Ufuah, University of Manchester
- [65] "Offshore Structures, Analysis and Design", Dr. S. Nallayarasu, Department of Ocean Engineering, Indian Institutes of Technology Madras, Chennai 600036 India.
- [66] http://www.treccani.it/enciclopedia/piattaforma/
- [67] http://karamanos.mie.uth.gr/index.php/stability-of-tubes-under-external-pressure-andstructural
- [68] https://www.brighthubengineering.com/marine-engines-machinery/30775-different-types-of-offshore-production-platforms-for-oil-extraction/#imgn\_2
- [69] "Sviluppo di giacimenti in mare", Fabio Pallavicini, Treccani, Enciclopedia degli idrocarburi, Roma, 2005, p. 609.
- [70] https://www.focus.it/tecnologia/innovazione/come-fanno-le-piattaforme-petrolifere-a-rimanere-ferme-in-mare?gimg=74534#img74534
- [71] https://www.bluewater.com/fleet-operations/what-is-an-fpso/
- [72] E. Pederiva "Towards the CFD simulation of accidents on off-shore platforms: dispersion of a turbulent jet hitting a cylinder", 2015, Politecnico di Torino
- [73] Benavides-Serrano A.J., Legg S. W., "A quantitative assessment on the placement practices of gas detectors in the process industries", 2014, Journal of loss prevention in

- the process Industries
- [74] Davis S., "Using CFD to analyze gas detector placement in process facilities". SUPDET, 2012, Suppression, Detection and Signalling Research and Applications Symposium.
- [75] Kelsey A., "Sensitivity studies on offshore gas detector networks based on experimental simulations of high pressure gas releases", 2005, Trans ICheme, Part B.
- [76] W. Henk Kaarle Versteeg, "An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method".
- [77] J. &. P. Ferziger, "Computational methods for fluid dynamics", USA, Springer: 3rd edition, Stanford, 2003.
- [78] ISO 73/2002, Risk management -- Vocabulary -- Guidelines for use in standards, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [79] M. Impalà, "Models and Tools for the simulation of exhaust dispersion in oil&gas offshore platforms", 2016, Politecnico di Torino.