

# Politecnico di Torino

Collegio di Ingegneria Energetica  
**Corso di Laurea Magistrale**  
**in Ingegneria Energetica e Nucleare**

Tesi di Laurea Magistrale

**Progettazione preliminare di un laboratorio  
sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali  
di gas in impianti oil&gas offshore**



**Relatori**

**Prof. Carpignano Andrea**

**Prof. Ganci Francesco**

**Candidato**  
**Nicolò Bono**

Luglio 2018

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci  
accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

## RINGRAZIAMENTI

Vorrei prima di tutto ringraziare la mia famiglia ed in particolare i miei genitori che non mi hanno mai fatto mancare il loro sostegno anche a costo di sacrifici, grazie per il vostro appoggio incondizionato in tutti questi anni. Grazie perché se sono quello che sono e mi trovo qui oggi è grazie a voi.

Grazie a mio zio Nanni, perché ci sei sempre stato e perché so che in qualsiasi momento e per qualsiasi cosa potrò sempre contare su di te.

Ringrazio i miei coinquilini Ciccio e Zac, perché in questi lunghi anni di convivenza sono diventati come una seconda famiglia. Siamo partiti assieme come 3 bambini scapestrati ed in questi anni siamo cresciuti assieme nei momenti facili e difficili fino a diventare quello che siamo oggi. Fino alla fine!

Un grazie a Federico e Fra perché siete stati tra le prime persone che ho conosciuto al Poli e che mi hanno subito fatto sentire a casa a Torino ed in particolare un grazie a Fra con cui ho condiviso la quasi totalità di questa scalata al miliardo!

Ringrazio Manu, perché come hai detto tu a volte basta uno sguardo per riconoscersi in qualcuno e capirsi al volo. Così è stato bro, ma manteniamo le nostre uscite a tre quattro all'anno perché sai com'è, dormire in una stazione GTT o sotto il letto non è il massimo anche se devo ammettere che è una cosa clamorosa da raccontare.

Un grazie particolare a "u fra" alias Dave, non mi dimenticherò mai gli accampamenti sul tuo divano, le nottate di sclero disperato con annesso shot di crema di strega, la "lista" dei motti e migliaia di altre cose. Grazie perché sei un compagno vero e il miglior braccio destro che si possa avere. Se ci fosse mai da pianificare la conquista della Galassia vorrei te come consigliere. Macigno.

Grazie a BEST, perché mi ha permesso di conoscere un nuovo mondo, di viaggiare, di conoscere gente in ogni dove in Europa e soprattutto di conoscere delle persone fantastiche qui a Torino, che sono diventate parte della mia vita. Potrei stare qui a raccontare migliaia di storie, di momenti, di stupidaggini...Belgrado, Mosca, i Mongolian alla prima riunione AJ, le nottate con Ale a prepararlo l'AJ, e poi il giro della morte, i costumi, le feste..insomma grazie.

Grazie a Vivi per tutti i momenti belli passati assieme, e per riuscire a colorarmi anche le giornate più grigie.

Un grazie i miei amici di sempre, i miei hermanos di giù, perché nonostante la distanza, il legame che ci unisce praticamente da sempre è indissolubile.

Ringrazio i miei professori Carpignano, Ganci e Gerboni per il supporto, la disponibilità, la professionalità e per gli utili consigli.

Ringrazio chi c'era, chi c'è e chi ci sarà...Ad Maiora Semper!

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci  
accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

## ABSTRACT

Preventing accidental events is a fundamental topic in many situations and especially in work environments. In particular this aim becomes critical if we are talking about contexts in which a potentially dangerous situation may lead to accidents that can affect both human health and environment with very big consequences. Trying to avoid or to mitigate these issues, is one of the main purposes in the oil&gas offshore context, where the dangerous characteristics of the treated materials and the highly congested environment could lead to a potentially high-risk situation and eventually to a disaster. The Piper Alpha incident in 1988 is probably the most significative example of what could happen when a correct risk analysis is not performed.

The final aim of this work is to design an experimental laboratory where we want to recreate, as close as possible, the hazardous situation that could exist in an offshore plant. The idea is to simulate the accidental gas release in an oil&gas platform with the help of the fluid-dynamic analysis and then thanks to the experimental lab trying to validate these results. The goal we want to fulfill is to build a hybrid approach using both CFD and experimental simulation in order to provide a valid tool for improving the safety in the offshore platform context for example developing a proper fire and gas detection system and optimizing the position of the detectors in order to avoid potentially unsafe situations.

Firstly, we had to choose a proper scale for our platform model in order to let the wind motion field, we wanted to simulate, being completely developed. This was fulfilled with the help of accurate CFD simulations, through the use of FLUENT software. Once identified the proper scale, the mock-up model was designed, as much as representative of the Italian offshore context. A second important challenge was to find the proper gases for the simulation of the accidental release and the exhaust dispersion that occur in a plant like the one we are focusing on. This was a crucial point in the realization of the project, because, in order to avoid potentially risky situation in the lab, we had to find gases that not only were able to simulate properly the behavior of the real gases involved in the real plant, but that also were not dangerous for the personnel who was going to run the experimental simulations. Once identified them, we had to design the gas distribution system in order to simulate as accurately as possible the real conditions in the platform.

Finally, we have designed all the other systems and items indispensable to guarantee safe conditions for the workers in the lab and we planned the set and modalities for the experiments.

Once the lab will be in operation it will be possible to start an experimental campaign in order to validate the CFD models developed and to understand if these model could be used as a real powerful tool in the risk analysis for the oil&gas offshore context.

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci  
accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

## Indice

<b><u>RINGRAZIAMENTI.....</u></b>	<b><u>3</u></b>
<b><u>ABSTRACT .....</u></b>	<b><u>5</u></b>
<b><u>RIASSUNTO.....</u></b>	<b><u>9</u></b>
<b><u>1 INTRODUZIONE.....</u></b>	<b><u>13</u></b>
1.1 IL CONTESTO OFF-SHORE .....	14
1.1.1 LE STRUTTURE OFFSHORE .....	16
1.1.2 PIATTAFORME A STRUTTURA FISSA .....	16
1.1.3 PIATTAFORME A STRUTTURA GALLEGGIANTE.....	19
1.1.4 SISTEMI DI SICUREZZA E DI EMERGENZA .....	20
1.1.5 IL PROCESSO DI ESTRAZIONE DI GAS NATURALE IN UNA PIATTAFORMA OFFSHORE .....	22
1.1.6 IL CONTESTO OFFSHORE ITALIANO .....	23
1.2 ANALISI DI RISCHIO .....	27
1.2.1 INTRODUZIONE ALL'ANALISI DI RISCHIO.....	27
1.2.2 RISCHI IN AMBITO OFFSHORE .....	28
1.2.3 LA STRUTTURA DELL'ANALISI .....	31
1.2.4 PREVENZIONE DEL RISCHIO .....	34
1.3 OBIETTIVI DEL LAVORO .....	35
<b><u>2 IL LABORATORIO.....</u></b>	<b><u>37</u></b>
2.1 FINALITÀ DEL LABORATORIO .....	37
2.2 CRITERI PROGETTUALI .....	38
2.2.1 STIMA DEGLI SPAZI.....	38
2.2.2 CONSIDERAZIONI DI SICUREZZA.....	39
2.2.3 CONSIDERAZIONI AMBIENTALI .....	39
2.2.4 LISTA DI PROGETTO.....	39
2.3 CONDIZIONI AMBIENTALI DA SIMULARE .....	40
2.3.1 IL VENTO .....	40
2.3.2 RAPPRESENTAZIONE DEL VENTO.....	41
2.3.3 CARATTERISTICHE DEL VENTO NEL MAR ADRIATICO.....	44
2.4 PROGETTAZIONE FLUIDODINAMICA DEL LABORATORIO.....	45
2.4.1 GEOMETRIA IPOTIZZATA DEL LABORATORIO .....	45
2.4.2 LA GALLERIA DEL VENTO.....	46
2.4.3 SCALABILITÀ DEL MODELLO .....	47
2.4.4 LE PROVE CFD.....	49
2.4.5 LAYOUT FINALE DELLA CAMERA DI PROVA.....	50
<b><u>3 LA PROGETTAZIONE .....</u></b>	<b><u>55</u></b>
3.1 DIMENSIONAMENTO DEL MOCK-UP SPERIMENTALE.....	56

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci  
accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

3.1.1	LA STRUTTURA.....	56
3.1.2	MODELLO DELLA PIATTAFORMA.....	56
3.1.3	GLI INGOMBRI .....	59
3.1.4	PIANTE E PROSPETTI MOCK UP .....	60
<b>3.2</b>	<b>ANALISI GAS PER LA SIMULAZIONE .....</b>	<b>60</b>
3.2.1	CARATTERISTICHE DEI GAS PER UTILIZZO IN LABORATORIO.....	60
3.2.2	GAS PURI PROPOSTI PER LA SIMULAZIONE DEL RILASCIO DI METANO.....	61
3.2.3	MISCELA DI GAS PROPOSTA PER LA SIMULAZIONE DEL RILASCIO DI METANO .....	63
3.2.4	GAS PROPOSTO PER LA SIMULAZIONE DEL RILASCIO DEI GAS ESAUSTI .....	66
<b>3.3</b>	<b>STUDIO SUI RILASCI DI GAS IN PRESSIONE .....</b>	<b>68</b>
3.3.1	FLUIDODINAMICA DEGLI EFFLUSSI DAGLI UGELLI CONVERGENTI E CONVERGENTI-DIVERGENTI.....	68
3.3.2	LO PSEUDO-DIAMETRO .....	77
3.3.3	SCELTA DEI PARAMETRI PER LA SIMULAZIONE DEL RILASCIO REALE.....	80
3.3.4	DIMENSIONE DEL DIAMETRO DI ROTTURA .....	81
3.3.5	PRESSIONE E TEMPERATURA DI RILASCIO.....	82
<b>3.4</b>	<b>SIMULAZIONI RILASCIO REALE .....</b>	<b>82</b>
<b>3.5</b>	<b>SIMULAZIONI RILASCIO IN LABORATORIO.....</b>	<b>87</b>
<b>3.6</b>	<b>ANALISI DEI CONSUMI .....</b>	<b>93</b>
<b>3.7</b>	<b>DIMENSIONAMENTO DELL'IMPIANTO PER IL RILASCIO DEL GAS.....</b>	<b>96</b>
3.7.1	DESCRIZIONE GENERALE DELL'IMPIANTO.....	96
3.7.2	SCELTA DEL VOLUME DEL BOX INTERMEDIO .....	96
3.7.3	CADUTE DI PRESSIONE .....	99
<b>3.8</b>	<b>DESCRIZIONE GENERALE DELLE PROVE.....</b>	<b>106</b>
3.8.1	RIEMPIMENTO INIZIALE DEL BOX INTERMEDIO .....	106
3.8.2	PROVE SPERIMENTALI.....	107
<b>3.9</b>	<b>ANALISI DELLE CONCENTRAZIONI IN LABORATORIO.....</b>	<b>108</b>
3.9.1	PHAST .....	108
3.9.2	SENSORISTICA.....	110
<b>3.10</b>	<b>LINEE GUIDA PER LA GESTIONE DEL LABORATORIO .....</b>	<b>114</b>
3.10.1	DEPOSITI D'USO .....	114
3.10.2	COLLOCAZIONE DEI DEPOSITI D'USO.....	114
3.10.3	REQUISITI GENERALI DEI DEPOSITI D'USO.....	115
3.10.4	CLASSIFICAZIONE DEI DEPOSITI D'USO.....	115
3.10.5	RESPONSABILE DEL DEPOSITO E CODICE DEL DEPOSITO .....	116
3.10.6	SEGNALETICA DEL DEPOSITO D'USO .....	116
3.10.7	CONNESSIONE DELLE BOMBOLE IN USO ALLA LINEA DI DISTRIBUZIONE.....	117
3.10.8	TUBAZIONI.....	117
3.10.9	VALVOLE D'INTERCETTAZIONE .....	117
3.10.10	PUNTI DI PRESA.....	118
3.10.11	FORMAZIONE DEGLI OPERATORI, PROCEDURE E ATTREZZATURE .....	118
<b>3.11</b>	<b>SISTEMI DI SICUREZZA DEL LABORATORIO .....</b>	<b>118</b>
3.11.1	POSIZIONE DEI RILEVATORI DI GAS .....	119
3.11.2	ALLARMI .....	119
3.11.3	INTERCETTAZIONE DEL FLUSSO IN CASO DI ALLARME .....	120
3.11.4	PROCEDURE DI EMERGENZA.....	120
3.11.5	SEGNALETICA ALL'INGRESSO DEL LABORATORIO.....	121
<b>4</b>	<b><u>CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI.....</u></b>	<b>123</b>

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci  
accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

<b>4.1</b>	<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>123</b>
<b>4.2</b>	<b>SVILUPPI FUTURI .....</b>	<b>124</b>
<b><u>BIBLIOGRAFIA .....</u></b>		<b><u>125</u></b>
<b><u>LISTA FIGURE.....</u></b>		<b><u>127</u></b>
<b><u>LISTA TABELLE .....</u></b>		<b><u>129</u></b>
<b><u>APPENDICE I.....</u></b>		<b><u>131</u></b>
<b><u>ALLEGATO 1 : LAYOUT MOCK-UP.....</u></b>		<b><u>133</u></b>

## RIASSUNTO

Negli ultimi anni si è assistito ad un aumento dell'utilizzo di fonti rinnovabili, questo soprattutto grazie alle strategie che sono state adottate in Europa e nel mondo nel periodo successivo al termine del Protocollo di Kyoto. In particolare in Europa con la Direttiva 2009/29/CE è entrato in vigore il cosiddetto pacchetto "Europa 2020", con validità a partire dal Gennaio 2013 e fino al 2020. Questo piano strategico tra i vari punti, prevede che i paesi dell'Unione Europea raggiungano entro il 2020 una produzione di energia da fonti rinnovabili pari al 20%.

Nonostante ciò, il petrolio e il gas sono ancora oggi alla base della produzione mondiale di energia, e sono destinati ad esserlo ancora per molto tempo. Da qui la necessità di sviluppare tecnologie che rendano accessibili le fonti fossili presenti in ambienti più ostili.

Lo sviluppo tecnologico ha, infatti, permesso di allargare gli orizzonti della ricerca di idrocarburi e di spostare l'attenzione verso ambienti più inospitali quali, ad esempio, i fondali marini ed in particolare la zona delle acque profonde. Per fare ciò è stato necessario riprodurre in mare aperto, attraverso strutture molto complesse, le stesse condizioni operative che si hanno sulla terraferma. L'obiettivo di tali strutture offshore, è dunque quello di estrarre idrocarburi, mantenendo sempre degli elevati standards di sicurezza sia per il personale che staziona a bordo, sia per l'ambiente circostante.

Come conseguenza di questo aspetto, durante la fase di progettazione di questi complessi, risulta fondamentale uno studio di analisi di rischio, in quanto alla base della progettazione dei complessi sistemi di sicurezza che saranno poi installati.

A questo proposito deve essere citata la Direttiva 2013/30UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 12 Giugno 2013, la quale, introdotta a seguito del grave incidente avvenuto nel Golfo del Messico, ha come *"obiettivo quello di ridurre il più possibile il numero di incidenti gravi legati alle operazioni nel settore degli idrocarburi offshore e limitarne le conseguenze, fissando dunque delle condizioni minime di sicurezza"*. [13][17] Essa dunque impone che *"Al fine di prevenire questo tipo di incidenti, gli operatori e i proprietari dovrebbero individuare in modo completo e sistematico tutti gli scenari di incidenti gravi legati alla serie di attività pericolose che possono essere svolte su impianto di questo tipo, sia per quanto riguarda un impatto sulla sicurezza del personale sia per quello ambientale. Per far ciò è necessaria una valutazione della probabilità e delle conseguenze e, pertanto, del rischio di incidenti gravi, nonché delle misure necessarie a prevenirli e delle misure necessarie per la risposta alle emergenze nel caso in cui dovesse tuttavia verificarsi un incidente grave."* [13][17] Dalla direttiva risulta dunque chiaro che effettuare una corretta analisi di rischio quantitativa è alla base di qualsiasi progetto che operi nel settore oil&gas offshore.

Il processo di estrazione e raffinamento degli idrocarburi estratti necessita di un elevato numero di apparecchiature che lavorano in condizioni operative che esigono pressioni e temperature elevate e che gestiscono dei fluidi pericolosi per l'uomo e per l'ambiente.

Dunque nell'ambito di un'analisi di rischio, ed in particolare nell'analisi delle conseguenze, uno degli scenari incidentali che viene analizzato nel dettaglio è un classico scenario di rilascio incidentale di gas pericolosi ad alta pressione e conseguente dispersione, in quanto è necessario che le misure di sicurezza adottate siano ben dimensionate per prevenire e/o mitigare una tale eventualità, il che richiede uno studio molto approfondito.

Ad oggi per studiare le conseguenze di un rilascio incidentale di gas durante la fase di analisi di rischio si utilizzano dei modelli semi-empirici, tali modelli risultano essere di rapida

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

implementazione, ma sono anche molto approssimativi. Dunque per migliorare la qualità dei risultati delle simulazioni di rilascio e dispersione si è introdotta la Computational Fluidodynamics (CFD), la quale sfrutta però dei modelli di calcolo molto dispendiosi dal punto di vista computazionale.

Il team del SEADOG, nato in collaborazione con il MISE, Direzione Generale per la Sicurezza, negli ultimi anni sta sviluppando un nuovo modello di analisi CFD “ibrido”, cioè a metà tra un’analisi CFD pura ed un approccio semi-empirico, il quale studia separatamente la fase di rilascio da quella di dispersione. La prima fase viene infatti modellata attraverso una scatola nera, denominata “source box” la quale contiene tutte le variabili che interessano la prima fase del getto supersonico come pressione, temperatura, geometria del foro etc. In questo modo l’analista potrà utilizzare tale scatola chiusa come dato di input per la seconda fase di dispersione che verrà, invece, simulata tramite un approccio CFD puro. In questo modo si diminuisce notevolmente il costo computazionale dell’analisi, abbattendo soprattutto quello relativo alla prima fase di rilascio supersonico, la più onerosa, ma al tempo stesso si mantengono degli elevati standards di accuratezza.

Parallelamente a questo primo progetto il SEADOG sta portando avanti un altro lavoro che mira allo sviluppo di un nuovo modello per l’ottimizzazione della posizione dei sensori in piattaforma, che attualmente è in fase progettuale e che mira a trovare un ottimo tra la posizione ed il numero di sensori che si trovano normalmente in piattaforma, evitando in questo modo problemi di sovradimensionamento con conseguente aumento del budget ma mantenendo un elevato standard di sicurezza. Questo per evitare ad esempio che durante un rilascio incidentale, a causa dell’ambiente fortemente congestionato, si formino delle sacche di gas in alcuni punti piuttosto che in altri, e che la sensoristica non si attivi in tempo non rilevando dunque la situazione di pericolo.

Una volta che saranno sviluppati tutti i modelli CFD sopracitati si vorrebbe verificare sperimentalmente la bontà dei risultati che essi forniscono, per capire se in futuro potranno veramente essere utilizzati come dei validi strumenti per lo studio delle conseguenze di rilasci incidentali nell’analisi di rischio per la progettazione delle piattaforme offshore.

Forti di questa necessità, il team del SEADOG ha, dunque, pensato di progettare un laboratorio sperimentale nel quale effettuare degli esperimenti di rilascio di gas in pressione in un modello di piattaforma in scala, che costituirà l’ambiente di prova degli esperimenti volti a confermare la bontà dei due modelli descritti in precedenza.

A seguito di una prima fase di progettazione fluidodinamica del laboratorio, sempre condotta presso il SEADOG [2], l’obiettivo generale di questo elaborato è procedere con una seconda fase progettuale preliminare del laboratorio che fungerà da base per condurre la campagna sperimentale prevista per la validazione dei modelli CFD sviluppati. In particolare la progettazione prevede i seguenti punti che saranno sviluppati nel capitolo 3:

- Dimensionamento di un mock-up sperimentale in scala, che fungerà da area di prova per il rilascio;
- Analisi dei possibili gas da utilizzare per le simulazioni di rilascio di metano;
- Dimensionamento del sistema di distribuzione del gas, necessario per sostenere il rilascio;
- Definizione e descrizione preliminare delle prove sperimentali;
- Definizione della sensoristica sul mock-up sperimentale.

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Con la prima fase di progettazione fluidodinamica è stata dimensionata la camera di prova del laboratorio, che sarà una galleria del vento in cui simulare le condizioni ambientali in cui si trova a lavorare una piattaforma offshore, ed in cui verrà ospitato il modello in scala della piattaforma. Inoltre grazie alle analisi fluidodinamiche è stato possibile trovare un fattore di scala opportuno, che permettesse di mantenere inalterate o quanto meno confrontabili le condizioni fluidodinamiche tra modello reale e modello in laboratorio. Tale risultato è stato di fondamentale importanza per il seguente lavoro.

Una volta identificato e giustificato il fattore di scalatura del modello reale della piattaforma, fissato a 1:10, si è andati avanti con la seconda fase progettuale, oggetto di tale studio.

Il punto di partenza è stato analizzare il panorama offshore italiano, che funge da base di partenza del lavoro, per cercare di costruire un modello di piattaforma che fosse rappresentativo del contesto analizzato. Una volta trovata la configurazione che meglio rappresenta un classico complesso offshore (di quelli che si possono facilmente trovare nel Mar Adriatico, sito scelto come rappresentativo dell'intero panorama italiano, a causa della sua elevata densità di piattaforme rispetto al resto dei mari italiani) ed appurato che il fattore di scala del modello 1:10 fosse ragionevole, si è proceduto alla modellazione del mock-up sperimentale tramite software commerciali di tipo CAD. Si è in particolare prestata attenzione alla disposizione delle apparecchiature nelle piante dei piani (decks) della struttura offshore, assicurandosi che tale disposizione fosse il più vicino possibile a quella reale. Ci si è concentrati particolarmente sul numero e la disposizione di tali oggetti per quanto riguarda il deck di produzione. Esso è infatti, dal punto di vista dell'analisi delle conseguenze di un rilascio incidentale, probabilmente il più importante dei piani che compongono una piattaforma offshore, perché è la zona in cui sono contenute la quasi totalità di apparecchiature e serbatoi che lavorano con fluidi infiammabili/tossici in pressione.

Costruito il modello del mock-up, il secondo importante passo è stato quello di effettuare uno studio sulle statistiche di classici incidenti di rilascio che possono avvenire in piattaforma, per comprendere quali potessero essere le variabili che interessano tale fenomeno, come ad esempio, temperatura, pressione e diametro del foro di rilascio.

Scelti i parametri di un tipico rilascio reale di gas, si è effettuata un'analisi di possibili gas da poter utilizzare in laboratorio per simulare il rilascio reale di metano. Si sono in particolare analizzati i seguenti gas: Neon, Anidride Carbonica, Argon e una miscela Metano-Aria (2,5%<sub>vol</sub>-97,5%<sub>vol</sub>), la cui concentrazione volumetrica di metano non costituisce un pericolo per la sicurezza essendo al di sotto del suo limite di infiammabilità (LFL).

Individuati i possibili candidati per la simulazione, il terzo passo è stato quello di scegliere i parametri di rilascio da utilizzare in laboratorio, ed in base ai risultati ottenuti è stata effettuata un'analisi dei possibili consumi di gas che ha portato alla scelta finale del gas da utilizzare per le prove.

Il passo successivo è stato il dimensionamento di massima dell'impianto di distribuzione del gas per il rilascio. Sono stati definiti tutti i componenti principali che lo dovranno comporre concentrandosi in particolar modo sulla scelta di un serbatoio polmone che sostenesse il rilascio nel tempo e su un'analisi delle cadute di pressione che ha condotto al dimensionamento del diametro della tubazione che conduce dal serbatoio polmone all'ugello finale.

A questo punto, definito il gas da utilizzare, ed il sistema di distribuzione, è stata fornita una prima descrizione delle prove sperimentali che dovranno essere condotte e una serie di indicazioni preliminari per la loro gestione.

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Il quinto passo è stato quello di simulare nuovamente il rilascio in laboratorio tramite il software commerciale PHAST per effettuare un'analisi delle possibili concentrazioni di gas e poter, dunque, prevedere, una volta fissate le condizioni al contorno del rilascio controllato, che concentrazioni di gas si sarebbero raggiunte sulla pianta dei deck del mock-up. A partire dai risultati di questa analisi si è potuto confermare che le dimensioni del mock-up fossero effettivamente idonee per poter misurare delle concentrazioni che non fossero trascurabili ed è stato in particolare possibile proporre un tipo di sensore che fosse in grado di leggere tali concentrazioni.

Infine è stata proposta una panoramica sulle modalità di gestione di un laboratorio di questo tipo, che tratta cioè con gas in pressione, soprattutto per quanto riguarda la gestione della zona di stoccaggio del gas e le varie considerazioni sui sistemi di sicurezza. Tali considerazioni fungeranno da linee guida per una terza fase progettuale che condurrà poi al progetto esecutivo.

## 1 INTRODUZIONE

Il contesto in cui si colloca la stesura della seguente tesi è quello della sicurezza sulle piattaforme petrolifere offshore.

In particolare l'obiettivo di tale elaborato è la progettazione di un mock-up sperimentale per effettuare delle simulazioni di rilasci accidentali di gas in questo tipo di ambiente.

Lo studio dell'evoluzione di eventuali nubi di materiale potenzialmente nocivo o tossico è infatti un punto cruciale nello sviluppo dei complessi petroliferi offshore, in quanto eventuali rilasci incidentali potrebbero provocare problemi più o meno gravi o addirittura sfociare in veri e propri disastri, emblematico è il caso dell'incidente della Piper Alpha avvenuto il 6 Luglio 1988.

La seguente tesi è stata sviluppata presso il laboratorio del SEADOG (Safety and Environmental Analysis Division for Oil and Gas) facente parte del dipartimento Energia (DENERG). Oltre ad una stretta collaborazione con i membri del team del SEADOG, ci si è avvalsi anche dell'assistenza di altri dipartimenti del Politecnico di Torino come il

- DIATI (Dipartimento dell'Ingegneria dell'ambiente, del territorio e delle infrastrutture)
- DISAT (Dipartimento di Scienza applicata e tecnologia)

Tutti i dipartimenti sopracitati hanno infatti preso parte ad un progetto molto più ampio frutto di una collaborazione tra il Politecnico e il Ministero dello Sviluppo Economico (MISE) – Direzione Generale per la Sicurezza.

Tra i vari obiettivi del bando sopracitato [1] vale la pena citare il seguente:

*“4) Progettazione e realizzazione di una installazione sperimentale che riproduca una piattaforma oil&gas offshore a scala ridotta per la validazione di modelli numerici per la simulazione di eventi incidentali e per l'analisi di prefattibilità della conversione della struttura per la produzione di acqua desalinizzata come esempio di decommissioning.”*

Il seguente lavoro si colloca dunque in un contesto molto più ampio che mira a migliorare la conoscenza sui possibili sviluppi di eventi incidentali su piattaforme offshore in modo da poterne migliorare la progettazione e la sicurezza.

Ad oggi alla base della progettazione di tali impianti possono infatti essere utilizzati delle analisi di tipo fluidodinamico (CFD) con appositi software, per studiare in modo accurato lo sviluppo e la dispersione di eventuali nubi infiammabili e/o tossiche risultanti da rilasci incidentali, con l'obiettivo di massimizzare la sicurezza ed evitare spiacevoli inconvenienti. Il problema di queste analisi però è che data la notevole complessità geometrica di tali strutture e il loro ambiente altamente congestionato, i modelli di calcolo ad oggi sviluppati risultano essere molto dispendiosi dal punto di vista computazionale oppure non risultano essere molto precisi, in quanto quest'ultimi funzionano molto bene in campo libero, cioè in ambienti privi di ingombri, sono invece decisamente meno efficienti in ambienti fortemente congestionati. 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”.

Si è detto che i classici modelli CFD utilizzati sono dispendiosi dal punto di vista del costo computazionale, questo perché tali modelli simulano sia la fase di rilascio del getto sia la fase di dispersione della nube e questo richiede tempi lunghi se si vogliono ottenere dei risultati

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

precisi. L'idea alla base del modello "ibrido" è quella di separare le due fasi di rilascio e dispersione. In particolare la fase di rilascio che di solito è un getto supersonico, e che risulta essere quella più dispendiosa dal punto di vista computazionale, viene modellata attraverso una scatola nera chiamata *source box*. All'interno di questa scatola nera viene studiato il fenomeno di rilascio del getto contro un ostacolo, e si ottengono tutti i gradienti delle grandezze che influenzano tale rilascio come pressione, temperatura ecc... che sono dunque raccolte come una sorta di catalogo. L'analista vedrà dunque solo tali variabili come output e potrà utilizzarle come input per modellare, tramite dei classici modelli CFD, la fase di dispersione. In questo modo si riducono drasticamente i tempi di calcolo ma si mantiene una elevata accuratezza dei risultati.

In questi anni il laboratorio del SEADOG ha dunque lavorato allo sviluppo di tale modello "ibrido" ed il prossimo passo sarà dunque quello di validare questo nuovo approccio in maniera sperimentale per assicurarne la robustezza e fornire dunque un nuovo strumento di valutazione del rischio che possa in futuro essere utilizzato per le nuove costruzioni o per migliorare quelle già esistenti.

Il team del SEADOG sta inoltre portando avanti un altro progetto che mira alla realizzazione di un modello che sia in grado di ottimizzare la posizione dei sensori di allarme antigas in una piattaforma, i quali devono intervenire tempestivamente nel caso si verifichi un rilascio non previsto di materiale tossico. Questo compito ha importanti risvolti pratici, in quanto per ovvie ragioni di budget non è possibile sovradimensionarne il numero in piattaforma, ecco che allora risulta necessario trovare un ottimo tra il numero di sensori ed una elevata copertura per quanto riguarda la sicurezza, in modo da evitare un aumento del budget complessivo a causa di un sovradimensionamento del sistema ma al tempo stesso di mantenere degli elevati standard di sicurezza. Una volta sviluppato tale modello che al momento è nella sua fase progettuale, sarebbe opportuno testare mediante esperimenti pratici anche quest'ultimo.

Per condurre, dunque, in futuro tali esperimenti di rilascio di gas in pressione, utili per testare e validare entrambi i modelli descritti è stato necessario progettare un laboratorio sia dal punto di vista delle condizioni ambientali in cui una piattaforma offshore si trova a lavorare, sia per quanto riguarda l'ambiente di prova in cui verrà effettivamente simulato il rilascio. In particolare il primo obiettivo è stato portato a termine grazie ad una progettazione fluidodinamica del laboratorio da parte del collega A. Tortora [2], mentre la restante parte della progettazione è stata oggetto di tale elaborato.

Nel seguente capitolo verrà in prima battuta introdotto il settore in cui si sviluppa l'elaborato di tesi, il settore petrolifero offshore, con particolare attenzione per il contesto italiano, che sarà la base di partenza per tutta l'analisi. Saranno inoltre introdotti i principali concetti dell'analisi di rischio e i parametri più importanti, ed infine sarà fornita una panoramica generale dei passi che sono stati seguiti per sviluppare la progettazione del laboratorio oggetto di tale lavoro.

### **1.1 Il contesto off-shore**

Negli ultimi anni si è assistito ad un aumento dell'utilizzo di fonti rinnovabili, questo soprattutto grazie alle strategie che sono state adottate in Europa e nel mondo nel periodo successivo al termine del Protocollo di Kyoto. In particolare in Europa con la Direttiva 2009/29/CE è entrato in vigore, con validità a partire dal Gennaio 2013 e fino al 2020, il cosiddetto pacchetto "Europa 2020". Questo piano strategico tra i vari punti, prevede che i

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

paesi dell'Unione Europea raggiungano entro il 2020 una produzione di energia da fonti rinnovabili pari al 20%.

Nonostante ciò, il petrolio e il gas sono ancora oggi alla base della produzione mondiale di energia, e sono destinati ancora ad esserlo per parecchio tempo.

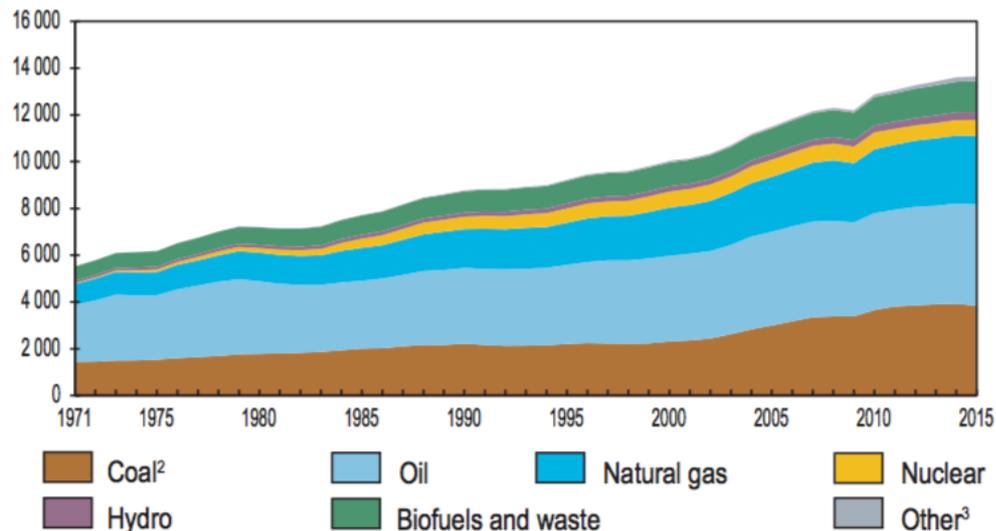


Figura 1: Consumo mondiale di energia primaria per tipo di vettore energetico [3]

L'operazione di estrazione di idrocarburi dal sottosuolo è una pratica che ha origini nella seconda metà del 1800, comunemente ci si riferisce alla perforazione da parte del colonnello Edwin Drake del primo pozzo petrolifero ad Oil Creek, in Pennsylvania [4]. L'obiettivo era quello di rendere disponibili le riserve di combustibile che durante la formazione del nostro pianeta si sono immagazzinate nella crosta terrestre.

In una prima fase però le attività di estrazione erano maggiormente concentrate sulla terraferma, ma con il passare degli anni, a causa di una sempre maggiore richiesta di energia, e a causa del fatto che la terraferma è stata quasi del tutto esplorata fino ad un dettaglio tale che è difficilmente pensabile la scoperta di nuovi giacimenti di grosse dimensioni, ci si è sempre di più interessati ai fondali marini, soprattutto alla zona nota come "acque profonde" (profondità maggiori di 1000 m) che può ancora oggi offrire molto.

Si è infatti stimato che "una quota non indifferente delle riserve mondiali di idrocarburi si trova appunto nei fondali marini e ad oggi si registra che circa il 30% della produzione totale di idrocarburi proviene proprio da settori di estrazione offshore. Questo, nonostante le maggiori difficoltà operative, gli investimenti maggiori e i rischi finanziari, giustifica la rapida crescita degli investimenti necessari per la ricerca e la produzione di idrocarburi in mare aperto." [5]

Una struttura di tipo offshore cerca di riprodurre in mare aperto le condizioni di lavoro di una struttura onshore. La funzione principale è infatti quella di estrarre gli idrocarburi dal sottosuolo cercando di mantenere degli alti requisiti di sicurezza e salvaguardia ambientale ed eventualmente trattarli.

Si può infatti fare una prima macro divisione delle strutture offshore:

- **Impianti di perforazione:** sono delle strutture il cui scopo è la perforazione di pozzi esplorativi. Essi sono infatti dei natanti progettati e realizzati con l'unico obiettivo di

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

realizzare un pozzo, nel caso in cui l'esplorazione faccia emergere la presenza di riserve tali da giustificare l'avvio dell'estrazione, occorrerà progettare ed installare le strutture permanenti di produzione.

- **Strutture di produzione:** sono capaci di contenere al loro interno gli impianti tecnologici e di sicurezza necessari alla corretta estrazione e trattamento degli idrocarburi. La dimensione può essere variabile e dipende dalla grandezza del giacimento e dalla distanza dalla costa.

### 1.1.1 Le strutture offshore

Esiste una vasta gamma di piattaforme offshore, da quelle fisse a quelle galleggianti. Il fattore discriminante tra un tipo ed un altro di piattaforma è la profondità d'acqua in cui gli impianti devono essere installati e le condizioni ambientali a cui devono far fronte.

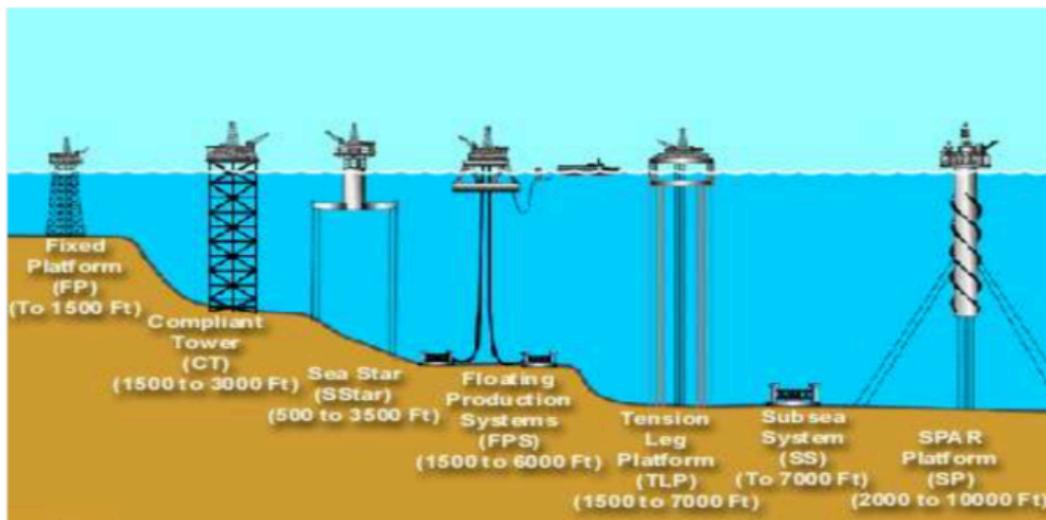


Figura 2: Profili di differenti tipi di piattaforme offshore [6]

Fondamentalmente questi possono essere suddivisi in due macro-categorie, sistemi di produzione a struttura fissa (poggianti sul fondale marino), e sistemi di produzione a struttura galleggiante.

Al di là del tipo di struttura adottata, la parte emersa della piattaforma, il cosiddetto topside, è comunque molto simile per tutti i tipi di struttura e presenta degli elementi comuni quali:

- Elideck: Piattaforma per il decollo e l'atterraggio di elicotteri necessari sia per il trasporto del personale a bordo sia per eventuali emergenze.
- Gru: necessarie per il carico o lo scarico a bordo delle merci o rifornimenti proveniente dai cargo.
- Alloggi per il personale.
- Torre di perforazione: sempre presente nelle piattaforme di perforazione, potrebbe invece non essere presente nelle piattaforme di produzione nel caso in cui i pozzi siano già stati realizzati precedentemente.

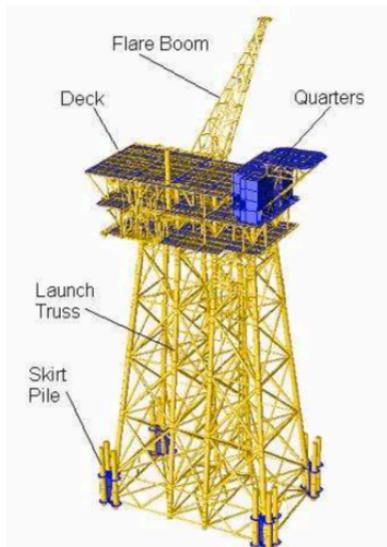
### 1.1.2 Piattaforme a struttura fissa

Le piattaforme fisse sono la tipologia di piattaforme che viene utilizzata per fondali poco profondi (nell'ordine dei 300-400 m, ma di norma al di sotto dei 200 m), esse sono in

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

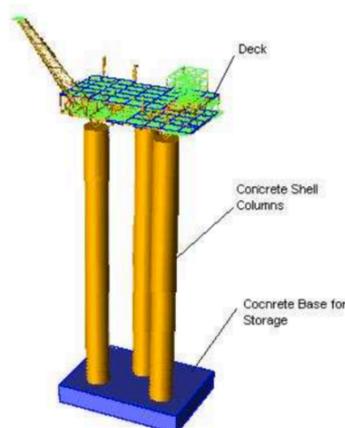
generale composte da una struttura di sostegno rigida, che viene fissata sul fondale marino e che ha il compito di sorreggere gli impianti di produzione, mantenendoli ad una distanza di sicurezza tale da evitare le azioni del moto ondoso.

La struttura di supporto in acciaio consiste in un'alta sezione composta da tubi in acciaio supportati da battipali direttamente ancorati sul fondo marino, che a loro volta sono fissati nella parte superiore ad un piano (Deck), sul quale vengono poi alloggiati l'impianto di perforazione, i sistemi per il trattamento degli idrocarburi, il modulo alloggi e tutti i sistemi ausiliari quali turbine, impianti di depurazione acqua e via dicendo.



*Figura 3: Piattaforma fissa con struttura di supporto in acciaio [6]*

Esistono anche le cosiddette strutture a gravità che sono utilizzate in quelle zone in cui la fattibilità di applicazione di una struttura in acciaio è molto bassa. Ovvero delle zone in cui i fondali marini sono particolarmente problematici, ad esempio dove c'è una massiccia presenza di rocce sporgenti. La piattaforma a gravità, da cui il nome, riesce a mantenere la propria stabilità contro le condizioni ambientali proprio grazie al suo enorme peso, che riesce ad ancorarla al fondale marino. Esse sono composte da una base molto massiccia e di larghe dimensioni appoggiata sul fondo del mare, la quale sostiene delle enormi colonne in cemento armato che fungono da supporto per l'intero topside. [7]



*Figura 4: Piattaforma fissa con struttura di supporto a gravità [6]*

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci  
accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Per profondità che vanno dai 500 ai 900 metri risulta praticamente impossibile affidarsi a delle strutture di tipo fisso, ecco che allora vengono utilizzate le cosiddette “compliant tower”

La Compliant Tower (CT) consiste in una torre stretta, flessibile ancorata al fondale, che è in grado di supportare un deck convenzionale per le operazioni di perforazione e produzione. A differenza della struttura fissa, questa torre è in grado di resistere molto bene ai carichi di forze laterali, in quanto è in grado di flettersi.



Figura 5: Compliant Tower [6]

Per profondità ancora maggiori, dell'ordine dei 1000-1200 metri si hanno le “tension leg platforms” (TLP).

Questo tipo di struttura è un tipo di piattaforma galleggiante, perennemente ormeggiata grazie a catene o tiranti verticali ancorati al fondo marino. Ogni gruppo di catene è chiamato appunto “Tension Leg” ed è caratterizzato da un'alta rigidità assiale, tale da eliminare ogni movimento verticale della piattaforma.

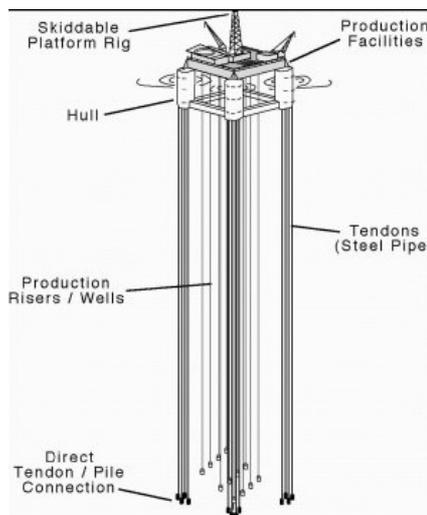


Figura 6: Piattaforma TLP

### 1.1.3 Piattaforme a struttura galleggiante

In alternativa o eventualmente in combinazione ai sistemi di produzione già esposti, esiste un'altra categoria di strutture di produzione, le cosiddette piattaforme a struttura galleggiante. [8] Questo tipo di struttura è necessaria se si vogliono raggiungere dei giacimenti su fondali che superano i 1000 metri di profondità fino ad un massimo di circa 3000 metri.

I sistemi di produzione a struttura galleggiante sono sostanzialmente tre:

**Piattaforma SPAR:** *“il cui scafo è costituito da una struttura a torre cilindrica di circa 25 metri di diametro e alta 200-250 m, che galleggia in assetto verticale grazie ad una opportuna disposizione in compartimenti stagni; la struttura è di tipo navale convenzionale, in acciaio irrigidito da centine ad anello e paratie trasversali e radiali.”* Queste piattaforme sono utilizzate a profondità che vanno dai 1000-2500 metri. [8]

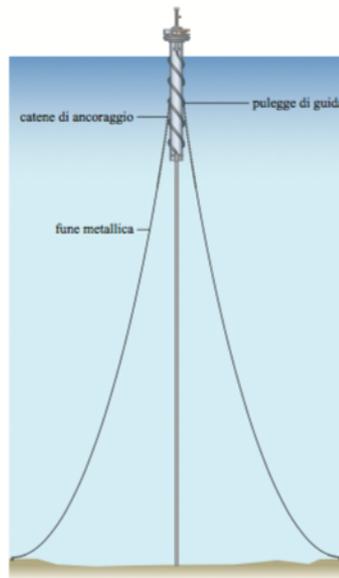


Figura 7: Piattaforma SPAR [8]

**FPS (Floating Production System):** Sono unità di produzione semisommergibili equipaggiate con le attrezzature necessarie per la perforazione dei pozzi e la produzione. Hanno una struttura analoga a quella dei mezzi di perforazione delle piattaforme fisse. *“L'unità di produzione galleggiante viene ormeggiata in una posizione baricentrica rispetto ai pozzi sottomarini, ai quali viene poi collegata mediante tubazioni rigide o flessibili che portano i fluidi di giacimento dalle teste pozzo fino agli impianti di superficie.”* [8] Lo svantaggio di questo tipo di scafo è di non disporre di capacità di stoccaggio.

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore



Figura 8: Impianto FPS (Eni-Saipem) [8]

FPSO (Floating Production Storage and Off-loading System): sono costituiti da uno scafo a carena convenzionale attrezzato con abbondanti stive in cui sono realizzati degli importanti serbatoi di stoccaggio. Una volta riempito il serbatoio queste unità si dirigono verso la costa dove scaricano negli impianti onshore il greggio estratto, dove poi verrà processato. Un sistema di tipo FPSO è utile nel caso di giacimenti modesti a profondità elevate, in aree dove non esistono oleodotti in grado di trasportare a terra il greggio estratto. Ad oggi esistono circa 70 strutture di questo tipo operanti in tutto il mondo. [7]

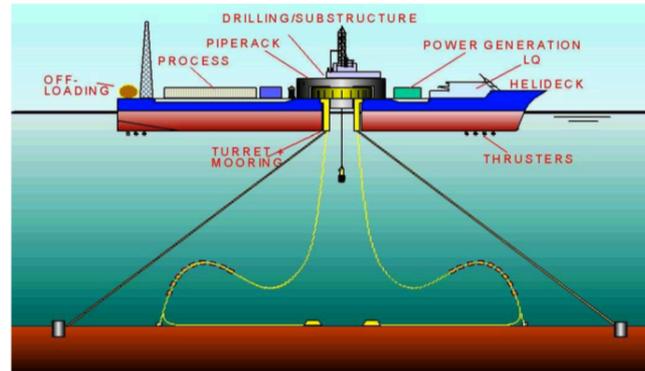


Figura 9: Impianto FPSO

### 1.1.4 Sistemi di sicurezza e di emergenza

In una piattaforma di tipo offshore, venire a contatto con fluidi pericolosi non è una cosa rara, in quanto a causa dei processi di estrazione ed eventuale trattamento si ha una forte presenza di sostanze tossiche per l'uomo e per l'ambiente. Lo studio di eventuali rilasci accidentali di gas pericolosi è dunque alla base dell'analisi di rischio in ambito oil&gas, proprio con l'obiettivo di prevedere piani di contenimento e/o mitigazione opportuni. Uno dei punti fondamentali per la sicurezza a bordo delle piattaforme è appunto l'adozione di sistemi di rilevamento e monitoraggio di gas infiammabili e tossici.

Il settore offshore è caratterizzato da un ambiente ampiamente congestionato a causa infatti del limitato spazio e dell'enorme quantità di ingombri dovuti ai processi di produzione, stoccaggio e supporto. Questo dà vita ad una geometria molto complessa che in caso di rilasci di gas nocivi può fare in modo che i gas si accumulino in alcune zone piuttosto che in altre.

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Tale condizioni possono influenzare negativamente la capacità dei sistemi di tracciamento e allarme di rilevare efficacemente la minaccia e quindi dar luogo ad incidenti.

Le principali specie chimiche gassose che normalmente si possono trovare in una piattaforma di estrazione di gas naturale sono principalmente quattro [9]:

- Idrocarburi ( $CH_4$ ): è una tipologia di rilascio di gas infiammabili che può verificarsi in seguito a rotture di serbatoi o di pipeline sia a pressione atmosferica che ad elevata pressione.
- Solfuro di idrogeno ( $H_2S$ ): è un gas che è naturalmente contenuto nei gas naturali dei pozzi. È causa di un rilascio estremamente tossico.
- Monossido di Carbonio ( $CO$ ): è originato dai processi di combustione per generare elettricità e dalla combustione del gas in eccesso.
- Biossido di Carbonio ( $CO_2$ ): ha la stessa origine del Monossido di Carbonio. È potenzialmente pericoloso solo in concentrazione relativamente alte e in spazi ristretti.

Tutti i sistemi di produzione offshore sono dunque caratterizzati da complessi sistemi di sicurezza, di seguito sono illustrati quelli che normalmente vengono adottati [8][5]:

- “Sistema di generazione di emergenza: è costituito da uno o più generatori alimentati a gasolio, che si attivano in caso di non funzionamento dei sistemi di generazione primaria.
- Sistema UPS (Uninterruptible Power Supply): è costituito da una serie di batterie che alimentano i sistemi vitali dell'intero sistema di produzione ed entra in funzione in caso di non funzionamento dei sistemi di generazione, sia primaria sia di emergenza.
- Sistema di blocco dell'impianto (Production Shut Down): interviene a bloccare il flusso della produzione di idrocarburi in caso di incidente.
- Sistema di scarico dell'impianto (Emergency Shut Down): interviene, sulle piattaforme a gas per scaricare il flusso degli idrocarburi prodotti in caso di incidente (bloccando l'arrivo dai pozzi e la partenza verso le flow lines e scaricando il gas in atmosfera attraverso torce fredde).
- Sistemi di rilevazione e conseguenti sistemi a blocchi: tramite una serie di sensori ripartiti su tutta la struttura, è possibile rilevare principi di incendio, fumi, fughe di gas ed atmosfere nocive, e quindi attivare i sistemi di allarme, di blocco attività e di protezione.
- Sistemi di protezione antincendio attiva: sono alimentati ad acqua, a schiuma, a  $CO_2$  e a gas inerte, e proteggono tutta la struttura; l'acqua è pompata direttamente dal mare, mentre le altre sostanze sono immagazzinate in appositi serbatoi.
- Sistemi di protezione antincendio passiva: consistono nell'applicazione di materiali resistenti alle alte temperature su tutti gli elementi strutturali e di impianto a rischio di prolungata esposizione al fuoco in caso di incidente, e il cui collasso potrebbe mettere a repentaglio la sicurezza dell'intero sistema di produzione. In particolare, la zona pozzi e di processo è solitamente isolata dalle altre aree della struttura mediante pareti antideflagranti ed antifiamma.
- Sistemi di evacuazione del personale: sono costituiti in genere da scale alla marinara, scialuppe e zattere di salvataggio, opportunamente dislocate sulla struttura di produzione.

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

- Sistemi per la sicurezza e la protezione del personale: sono dislocati in posizioni strategiche e consistono in giubbotti salvagente, maschere antigas, docce da utilizzare in caso di contatto con sostanze pericolose, etc.
- Sistemi di allarme e di telecomunicazione: i primi sono costituiti da dispositivi acustici e visivi che entrano in funzione automaticamente in caso di emergenza, mentre i secondi consentono al personale in piattaforma di comunicare internamente e con l'esterno.”

### 1.1.5 Il processo di estrazione di gas naturale in una piattaforma offshore

Si è già anticipato che l'obiettivo di una piattaforma offshore è quello di cercare di riprodurre in mare le stesse condizioni operative che si hanno sulla terraferma. Vediamo in particolare, come funziona il classico processo di estrazione e raffinamento degli idrocarburi in una piattaforma per la produzione di gas naturale.

I pozzi estraggono dal sottosuolo marino un fluido trifase che è un insieme di gas, olio, idrocarburi, sabbia e acqua marina. Questo fluido viene dapprima pulito per poi essere mandato ai separatori dove avviene appunto una prima separazione tra acqua e condensato.

A questo punto il condensato viene ulteriormente trattato e stabilizzato mentre il gas prodotto, noto come raw gas (gas sporco), continua il suo percorso verso le unità di desolforazione dove viene appunto rimosso l' $H_2S$ . Quest'ultimo noto come gas acido verrà in seguito ulteriormente trattato per ricavarne prodotti secondari mentre il prodotto rimanente, noto come gas di coda verrà mandato all'inceneritore. Il gas non acido viene ulteriormente trattato attraverso processi di disidratazione per la rimozione di ulteriore acqua e per la rimozione di eventuali tracce di azoto. Vengono poi recuperati quegli idrocarburi che condensano durante questo processo i quali vengono separati e venduti come prodotti finali assieme al gas rimanente. L'intero processo è schematizzato in Figura 10

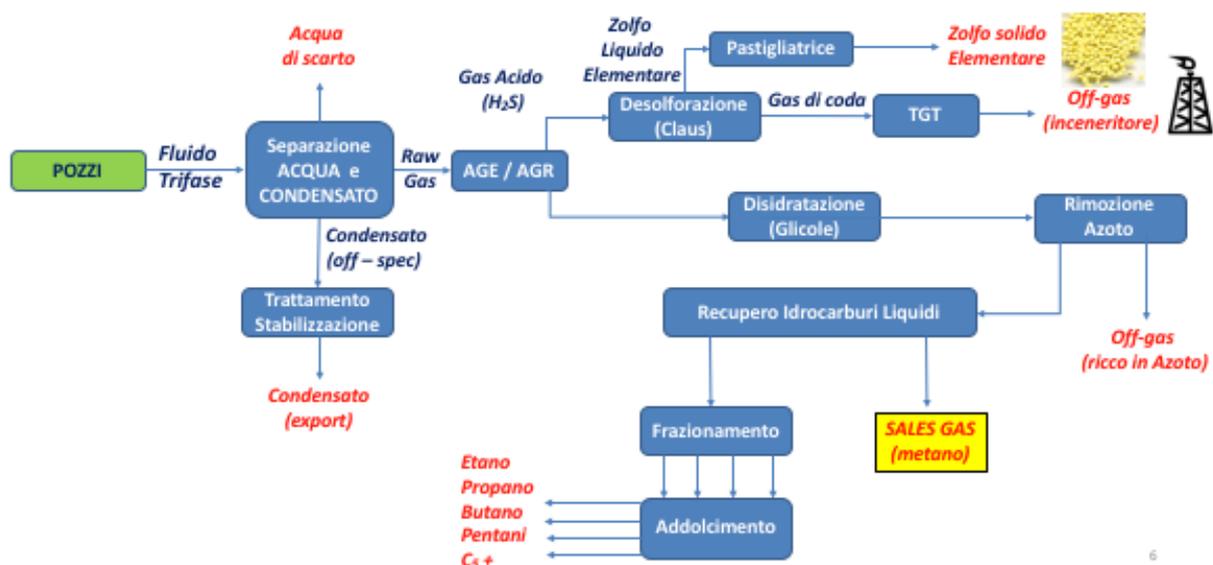


Figura 10: Processo di estrazione gas in piattaforma

Il gas prodotto alla fine sarà principalmente metano con una composizione come quella della seguente Tabella 1

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci  
accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Chemical Compound (% <i>mol</i> )	Natural Gas
N <sub>2</sub>	4.37
CO <sub>2</sub>	1.34
H <sub>2</sub> S	0.2
CH <sub>4</sub>	73.7
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	6.10
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	6.70
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	2.48
i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	1.41
C <sub>5</sub> +	3.70

*Tabella 1: Composizione gas naturale*

Nel paragrafo precedente si è detto che i principali gas tossici che si possono trovare in una piattaforma e che quindi possono essere considerati importanti per un rilascio accidentale sono il CH<sub>4</sub>, l'H<sub>2</sub>S, la CO e la CO<sub>2</sub>.

Mentre la CO e la CO<sub>2</sub> possono essere considerati come maggiormente presenti là dove si hanno i gas esausti di alcune apparecchiature come turbine, generatori diesel o all'inceneritore per quanto riguarda CH<sub>4</sub> ed H<sub>2</sub>S va fatta una precisazione.

Assunto che potrebbe verificarsi un foro in un'apparecchiatura, serbatoio o tubo in qualsiasi punto del processo con dunque relativo rilascio di gas in pressione. E' ovvio che a parte la zona d'impianto in cui circola il gas acido avrà un'altissima percentuale di H<sub>2</sub>S in tutto il resto dell'impianto circolerà fondamentalmente gas naturale. Tale gas avrà percentuali di altri contaminanti che saranno più o meno alte a seconda della zona d'impianto in cui potrebbe verificarsi il rilascio incidentale, ma comunque avrà sempre come componente principale il metano, ad eccezione ovviamente dei rilasci continui dei gas esausti.

In tale sede saranno dunque ci si focalizzerà sui rilasci incidentali da apparecchiature in pressione di solo metano e sarà proposto un eventuale gas per simulare anche i gas esausti. Non saranno invece trattati gli eventuali rilasci di gas acido.

### **1.1.6 Il contesto offshore italiano**

Il nostro Paese pur non essendo uno dei grandi produttori di idrocarburi del mondo, ha vissuto in maniera particolarmente attiva le varie fasi di sviluppo dell'esplorazione petrolifera negli ultimi 150 anni, con il risultato di poter disporre ad oggi di un notevole patrimonio energetico, rappresentato dai giacimenti di gas e di petrolio scoperti. In Italia sono infatti oltre 450 i giacimenti finora trovati, in terra e in mare. Secondo recenti valutazioni, l'Italia possiede ancora nel proprio sottosuolo un volume di idrocarburi superiore a quasi tutti gli altri Paesi dell'Europa Occidentale. [10]

La storia dell'esplorazione petrolifera italiana ebbe inizio nella seconda metà del 1800 con qualche iniziativa isolata nell'Appennino emiliano (Ozzano 1860) e in Abruzzo (Tocco Casauria).

Momenti importanti della storia petrolifera italiana sono sicuramente il 1926, quando lo Stato Italiano decise di intervenire nell'esplorazione petrolifera, costituendo l'Agip, la quale avviò una serie di campagne di ricerca non solo in Italia ma anche in altri Paesi esteri quali Albania, Romania, Libia, Eritrea, Somalia ed Iraq; ed ovviamente il 1953 quando fu istituita l'Eni, con Enrico Mattei alla presidenza.

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

A seguito della nascita dell'Eni seguirono numerosi scoperte di gas e di olio in tutta la penisola, e nel 1959 si ebbe un ulteriore importante passo avanti nell'esplorazione, con l'apertura della ricerca in mare. L'Italia in quel caso fu all'avanguardia, in quanto il primo pozzo offshore in Europa fu eseguito proprio nel nostro Paese, al largo delle coste siciliane, con lo scopo di controllare l'estensione in mare del giacimento di Gela (Agip 1959), cui seguiranno negli anni seguenti i successi di piattaforme quali *Perla* e *Vega A*.

In seguito con la nuova legge sull'offshore, vennero scoperti importanti scoperte di gas nell'Adriatico Ravennate (1963-68), e nell'Adriatico Centrale (giacimento di S. Stefano Mare, Elf 1967).

Nell'offshore calabrese nel 1989 fu scoperto il giacimento gassifero di *Luna* nelle acque di Crotona e nei primi anni 1990 fu eseguito dall'Agip il primo pozzo in acque profonde oltre 800 metri al largo delle coste pugliesi.

Alla fine degli anni 1980 la produzione nazionale annuale di olio e gas raggiunse i 20 milioni di tonnellate equivalenti di petrolio, che in Europa Occidentale, risultavano inferiori solamente ad Olanda e Regno Unito. [10]



Figura 11: Giacimenti di idrocarburi e rete dei metanodotti in Italia. [10]

### 1.1.6.1 L'offshore italiano

Come si evince dai rapporti del MISE in Italia ad oggi esistono 139 piattaforme petrolifere, di cui 9 non più operative e le restanti 130 attive, di queste:

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

- 120 sono piattaforme di produzione;
- 10 di supporto alla produzione (Compressione e raccordo);

Di queste 120 strutture,

- 12 sono teste di pozzo sottomarine;
- 108 sono con struttura emersa;

Tra le piattaforme con struttura emersa 77 possono essere considerate a struttura complessa, ovvero che sono in grado di ospitare del personale, con conseguente necessità di ospitare un modulo alloggi per quest'ultimi più tutti i servizi ausiliari necessari.

La maggior parte delle strutture sono localizzate nell'alto Adriatico (circa il 90%), mentre la restante parte si trovano per lo più nel Mar Ionio e Mediterraneo.

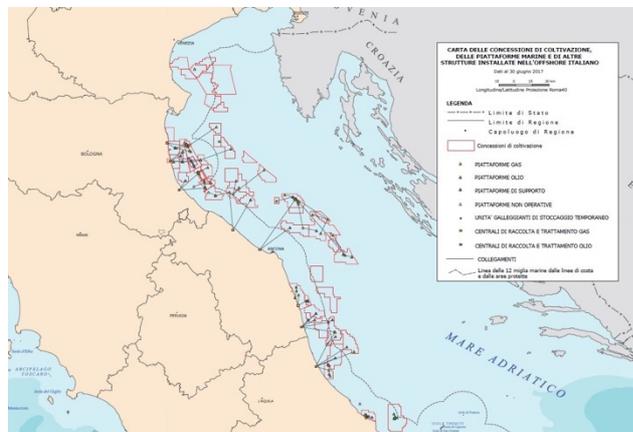


Figura 12: Carta delle concessioni di coltivazione delle piattaforme marine in alto Mar Adriatico [11]

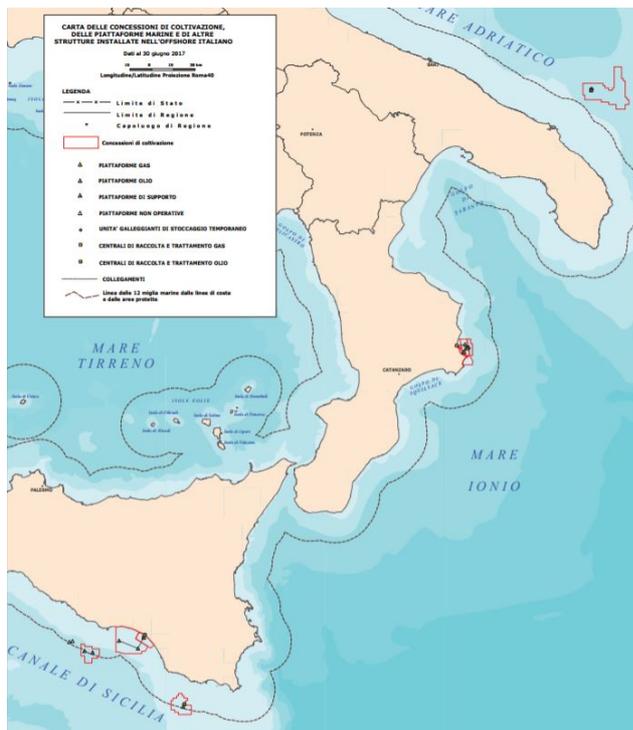


Figura 13: Carta delle concessioni di coltivazione delle piattaforme marine basso Mar Adriatico e Sicilia [11]

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Una prima grande distinzione va effettuata riguardo la distanza dalla costa. Come si vede dalla Figura 12 e Figura 13, 95 installazioni rientrano entro il limite delle 12 miglia tale limite è d'interesse poiché il 9 agosto 2013 è stato emanato un Decreto Ministeriale che ha ridefinito le aree marine di competenza italiana in cui è consentito svolgere attività di prospezione e ricerca di idrocarburi offshore, vietando ogni nuova iniziativa entro le 12 miglia dalla costa. [12]

La struttura principale di queste piattaforme è di tipo fisso con struttura reticolare in acciaio a 8 gambe (42%) o a 4 gambe (37%), questo è dovuto soprattutto alla bassa profondità delle acque del Mar Adriatico, e mediamente presentano un numero di deck che varia tra 2 e 3.

Sono invece solamente 3 le strutture galleggianti di supporto per lo stoccaggio FSO e FPSO, che servono le piattaforme più a largo come ROSPO MARE A, ROSPO MARE B, ROSPO MARE C, AQUILA 2, AQUILA 3 e VEGA A.

Inoltre più del 90% di tutte le strutture presenti sul suolo italiano, estraggono gas e solamente 13 piattaforme estraggono olio, e sono maggiormente concentrate nel Mar Mediterraneo.

Tra queste vale la pena citare *Vega A*, che ad oggi è la più grande piattaforma petrolifera fissa realizzata nell'offshore italiano.

Essa è ubicata a circa 12 miglia a sud della costa meridionale della Sicilia, a largo di Pozzallo.

La piattaforma è stata appoggiata nel febbraio 1987, su un fondale di circa 122 metri di profondità d'acqua tramite un Jacket, struttura di acciaio tubolare a forma di traliccio con otto gambe ancorate al fondo marino per mezzo di 20 pali, su cui sono stati successivamente posati i restanti moduli di produzione e servizi. [11]



Figura 14: Piattaforma Vega (Edison) [11]

## 1.2 Analisi di rischio

Il design di una struttura offshore dipende da moltissimi fattori come, ad esempio, le caratteristiche dell'ambiente nel quale il sito verrà sviluppato e le condizioni meteorologiche cui la piattaforma dovrà far fronte. Uno dei punti cruciali è appunto come la struttura risponda a queste sollecitazioni esterne, ma soprattutto come questa riesca a mantenere una situazione di sicurezza e riesca a prevenire o mitigare eventuali scenari incidentali legati alle complesse e pericolose operazioni di processo e gestione di sostanze altamente pericolose per l'uomo e per l'ambiente. Una piattaforma offshore deve dunque necessariamente avere degli altissimi standard di sicurezza. A questo proposito va assolutamente citata la Direttiva 2013/30UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 12 Giugno 2013 sulla sicurezza delle operazioni in mare nel settore degli idrocarburi. Essa ha infatti *“come obiettivo quello fissare elevati standard minimi di sicurezza per la prospezione, la ricerca e la produzione di idrocarburi in mare aperto, riducendo le probabilità di accadimento di incidenti gravi, limitandone le conseguenze e aumentando, così, nel contempo, la protezione dell'ambiente marino.”* [13] [17] Essa è scaturita come reazione da parte della Commissione Europea all'Incidente del Golfo del Messico dell'Aprile 2010, che avendo provocato un disastro ambientale, ha sensibilizzato moltissimo l'opinione pubblica e di conseguenza i vari governi del mondo sui criteri di sicurezza da mantenere per tali complessi.

### 1.2.1 Introduzione all'analisi di rischio

L'analisi di rischio assume un ruolo fondamentale nella fase di progettazione e design di un complesso offshore. Essa non è altro che una metodologia sviluppata per evidenziare e studiare, appunto, i rischi associati a degli eventuali scenari incidentali e le loro conseguenze dirette ed indirette sull'ambiente e le persone. Grazie a questo tipo di analisi vengono infatti individuati quelli che possono essere considerati i punti deboli di un sistema tecnologico complesso, e vengono analizzate tutte le conseguenze relative ad un problema che potrebbe verificarsi in questi punti, in modo tale da adottare delle strategie che possano in qualche modo eliminare o mitigare il rischio associato a tali conseguenze.

Nello standard internazionale ISO 73/2002 [14] il rischio è definito come segue:

“La combinazione delle probabilità di un evento e le sue conseguenze”

Utilizzando un approccio più tecnico, il rischio può essere espresso con la seguente equazione [15]:

$$R = \sum_{i=1}^n (p_i D_i) \quad (1)$$

Dove:

- “n” è il numero della sequenza di incidenti;
- “p” è la probabilità associata alla sequenza incidentale “i”, dove  $0 \leq p \leq 1$ ;
- “D” è il danno associato alla sequenza incidentale “i”.

Un aspetto che è importante sottolineare e che dimostra quanto l'analisi di rischio non è semplicemente un approccio tecnico, è la percezione del rischio. Soprattutto quando si ha a che fare con dei rischi collettivi, la percezione di quest'ultimo da parte dell'opinione pubblica, può essere profondamente diverso da quello effettivamente calcolato. Ad esempio, un evento catastrofico nel quale c'è stato un numero considerevole di morti, ma con una frequenza bassa può avere lo stesso valore di rischio di un evento con poche morti ma con un'alta frequenza di accadimento. Matematicamente parlando gli scenari sono uguali in quanto il valore del rischio

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

è uguale, ma la percezione da parte dell'opinione pubblica è diversa. Per quest'ultima infatti un danno piccolo alla quale è associato un'alta frequenza rappresenta un rischio molto più accettabile rispetto ad un danno molto grosso ma con una frequenza piccola.

Di seguito un chiaro esempio di quanto detto:

<b>Event A: failure of a dam</b>	<b>Event B: rail accident</b>
$F = 6 \times 10^{-5}$ events / year	$F = 12$ events / year
$D = 1,000,000$ deaths / event	$D = 5$ deaths / event
$R = F \times D = 60$ deaths/ year	$R = F \times D = 60$ deaths / year

*Figura 15: Confronto di due eventi incidentali con lo stesso rischio ma diversa percezione da parte dell'opinione pubblica [16]*

Dalla tabella risulta chiaro che entrambi gli eventi “Crollo di una diga” e “Incidente ferroviario” abbiano lo stesso valore di rischio, dunque entrambi dovrebbero essere considerati accettabili allo stesso modo, ma dal punto di vista della comunità un incidente ferroviario presenta un rischio molto più accettabile rispetto al crollo di una diga, confermando come un evento con conseguenze catastrofiche viene accettato di meno rispetto ad un evento con conseguenze lievi o modeste. Le ragioni di questo fenomeno possono essere molteplici e sicuramente i media hanno un ruolo fondamentale, in quanto sono soliti enfatizzare eventi catastrofici e dare invece poca importanza ad incidenti comuni.

### 1.2.2 Rischi in ambito offshore

Nel settore offshore i maggiori rischi che si possono avere sono i seguenti:

- Rischio per il personale;
- Rischio ambientale;
- Rischio per il business;

Quest'ultimo a sua volta può essere suddiviso in

- Rischio per i beni;
- Rischio associato all'interruzione della produzione
- Rischio associato a danni d'immagine per la compagnia proprietaria della struttura.

#### 1.2.2.1 Rischi per il personale

Durante l'individuazione dei possibili rischi per il personale, vengono ovviamente, analizzati i rischi ai quali potrebbero essere esposti coloro che lavorano sulla piattaforma stessa. Non vengono analizzati eventuali rischi per il pubblico, vista l'ubicazione in mare aperto di queste strutture.

I principali rischi cui potrebbe essere esposto il personale sono i seguenti:

- Incidenti del mestiere;
- Incidenti gravi;
- Incidenti di trasporto;
- Cadute in mare aperto;

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Per quanto riguarda gli incidenti definiti “gravi” si può trovare una loro definizione nella Direttiva 2013/30UE del parlamento europeo e del consiglio del 12 Giugno 2013.

Essi sono infatti definiti come segue [17]:

“1) «*incidente grave*»: in relazione a un impianto o a infrastrutture connesse:

a) un incidente che comporta un'esplosione, un incendio, la perdita di controllo di un pozzo o la fuoriuscita di idrocarburi o di sostanze pericolose che comportano, o hanno un forte potenziale per provocare decessi o lesioni personali gravi;

b) un incidente che reca all'impianto o alle infrastrutture connesse un danno grave che comporta, o ha un forte potenziale per provocare, incidenti mortali o lesioni personali gravi;

c) qualsiasi altro incidente che provoca la morte o lesioni gravi a cinque o più persone che si trovano sull'impianto in mare in cui ha origine il pericolo o sono impegnate in un'operazione sull'impianto in mare nel settore degli idrocarburi o sulle infrastrutture connesse o in collegamento con tale impianto e tali infrastrutture;

d) qualsiasi incidente ambientale grave risultante dagli incidenti di cui alle lettere a), b) e c).

Al fine di stabilire se un incidente costituisce un incidente grave a norma delle lettere a), b) o d), un impianto che è di norma non presidiato è considerato come se fosse presidiato;”

La maggior parte di questi incidenti sono considerati incidenti diretti, in quanto possono accadere durante le normali operazioni direttamente sulla piattaforma. Un tipo d'incidenti indiretti possono invece considerarsi quelli che avvengono durante il trasporto tramite elicottero o altri mezzi dalla terraferma alla struttura offshore.

Il rischio per il personale può anche essere suddiviso in rischio fatale e non. Il rischio fatale può essere espresso attraverso vari parametri come, ad esempio, il PLL (Potentially Loss of Lives), e l'FPPY (Fatalities Per Platform Per Year), e può essere riferito ad una singola persona (rischio individuale) tramite il FAR, l'AIR, o ancora l'IRPA (Individual Risk Per Annum), oppure ad un gruppo di persone attraverso le cosiddette curve f-N.

Il rischio non fatale si basa su alcuni aspetti che assicurano la sicurezza del personale in caso d'incidenti gravi e questi sono noti come “main safety functions”. [18]

PLL può essere rappresentato da una somma di contributi differenti: morti immediate, incidenti in elicottero o incidenti di evacuazione. I principali incidenti, la loro frequenza e il danno associate principalmente presenti in ambito offshore sono riportati in Tabella 2. [16]

Hazard category	Annual PLL values	%	Fatalities/accident
Blowout	$4.1 \times 10^{-3}$	27.3	5.3
Process accidents	$9.6 \times 10^{-4}$	6.4	0.7
Riser, pipeline accidents	$5.3 \times 10^{-3}$	35.3	4.1
External accidents	$2.3 \times 10^{-4}$	1.5	1.4
Occupational accidents	$2.6 \times 10^{-3}$	17.3	1.1
Helicopter accidents	$1.4 \times 10^{-3}$	9.3	2.8
Total all categories	$1.5 \times 10^{-2}$	100.0	2.3

Tabella 2: Incidenti più comuni in una piattaforma offshore [15]

### 1.2.2.2 Rischio ambientale

Il rischio ambientale consiste in vari pericoli tra cui

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

- Fuoriuscita di fluidi tossici dai serbatoi nel topside o direttamente in mare dagli oleodotti;
- Eccessiva contaminazione dell'acqua di produzione;

Come è facile aspettarsi, essendo la quasi totalità di questi incidenti dovute a fuoriuscite di materiale pericoloso in ambiente, il rischio ambientale si misura in quantità di fluido riversata per frequenza di fuoriuscita. Un altro modo di misurare questo tipo di rischio soprattutto se si parla di riversamenti in mare che potrebbero raggiungere la costa è la quantità di area contaminata. Mentre il danno viene di solito espresso in quantità di tempo necessario per l'ambiente di tornare alle condizioni pre-incidente.

Nella seguente Tabella 3 sono illustrate le principali categorie di incidenti dovuti a fuoriuscite:

Environmental consequence category	Corresponding amount spilled (tons)	Annual frequency
Minor effect	10	$3.4 \times 10^{-3}$
Moderate effect	500	$8.6 \times 10^{-4}$
Major effect	10,000	$9.7 \times 10^{-6}$

*Tabella 3: Tipologie di fuoriuscite [15]*

Come si vede dalla tabella eventi disastrosi in cui si verificano riversamenti per valori superiori alle 10.000 tonnellate sono molto rari. Tra questi ovviamente va citato l'incidente nel Golfo del Messico nel 20 Aprile, 2010, presso la piattaforma che stazionava nel nord del golfo del Messico ad una distanza di 210 Km a Sud-Est di New Orleans e a a meno di 100 Km di distanza dalla foce del fiume Mississippi. Questa catastrofe fu molto grave anche a causa del fatto che il rilascio fu continuo (furono rilasciate circa 800 tonnellate di petrolio al giorno). [19]

### **1.2.2.3 Rischio per il business**

All'interno di questa categoria si possono trovare i rischi associati a delle conseguenze che possono costituire appunto una perdita per il business in maniera diretta o indiretta, a causa di una perdita di denaro per danni effettivi, per danni d'immagine o appunto in maniera indiretta a causa di una interruzione della produzione.

#### **1.2.2.3.1 Rischio per i beni**

Il rischio per i beni, prende in considerazione tutti i danni ai macchinari e apparecchiature, strutture ed interruzioni di produzione. Questo tipo di rischio può essere espresso in vari modi tra cui danni attesi alle strutture, ritardo di produzione atteso e la frequenza di eventi con simili conseguenze.

#### **1.2.2.3.2 Rischio per la reputazione della compagnia**

I danni possono anche essere danni d'immagine riferiti alla reputazione della compagnia. La classificazione del rischio è simile ai casi precedentemente trattati ma in termini di diffusione di informazioni, dovuta a giornali e media in generale. Ovviamente più il danno è conosciuto dall'opinione pubblica a causa del diffondersi della notizia, maggiore sarà questo rischio. [20]

Basti pensare al già citato incidente del Golfo del Messico, per il quale, in termini puramente economici la British Petroleum pagò un risarcimento di 18,7 miliardi di dollari, oltre all'immenso danno d'immagine che ne scaturì.

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

L'eco dell'incidente è stato infatti così elevato che ha provocato in molti paesi una serie di adeguamenti normativi in materia di attività petroliera offshore come la già citata Direttiva Europea 30/2013 [17]

### 1.2.3 La struttura dell'analisi

Un'analisi di rischio comprende necessariamente i seguenti elementi:

- Descrizione del sito/impianto;
- Collezione ed analisi di tutte le schede di sicurezza tecniche delle sostanze utilizzate sull'impianto;
- Analisi storica degli incidenti passati, avvenuti su impianti dello stesso tipo;
- Quantitative Risk Analysis (QRA)

La QRA, nota anche come Probabilistic Risk Assessment, è una disciplina che permette una conoscenza approfondita dei rischi presenti in un impianto ed è dunque di fondamentale importanza per l'implementazione di sistemi di sicurezza atti ad evitare e mitigare tali rischi.

Una QRA inizia sempre con una formale Qualitative Risk Analysis (Q), che è in grado di rilevare le principali debolezze di un sistema, ed è anche in grado di fornire i maggiori contribuenti al rischio, grazie ad un'analisi di tipo probabilistico ed una simulazione delle conseguenze associate.

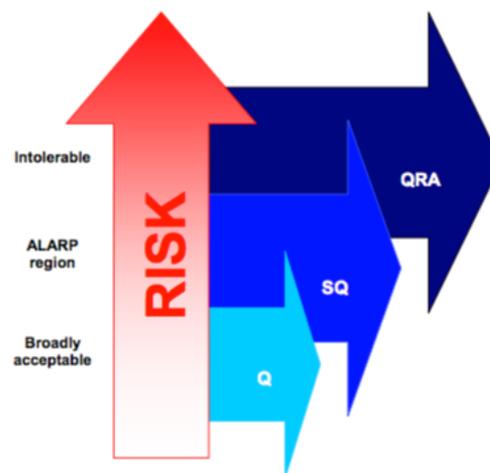


Figura 16: Steps dell'analisi di rischio [20]

La QRA si sviluppa poi sui seguenti punti:

- Hazard Identification;
- Frequency assessment e valutazione del danno;
- Analisi della sequenza incidentale;
- Valutazione del rischio.

#### 1.2.3.1 Hazard Identification

L'Hazard Identification è in grado di identificare tutte le anomalie/deviazioni che possono avvenire nel sistema a causa di fallimenti dei macchinari, errori umani, o eventi esterni.

Per portare a termine questo primo step dell'analisi, sono disponibili diverse metodologie, quali

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

- HAZID
- What-if analysis
- HAZOP
- FMEA

Questi sono tutti processi strutturati in grado di identificare potenziali incidenti, cause scatenanti e conseguenze annesse. I risultati sono di tipo qualitativo. Di solito per rendere l'analisi più semplice, il sistema è suddiviso in piccoli sottosistemi più facili da analizzare.

### 1.2.3.1.1 HAZID

L'HAZID analysis porta all'individuazione delle deviazioni più critiche all'interno di un sistema da considerare come Eventi Iniziatori (I.E.) nella QRA. Vengono dapprima individuate le funzioni principali che il sistema implementa, e queste vengono a loro volta scomposte in funzioni più semplici, che saranno poi analizzate nel dettaglio per valutarne le eventuali deviazioni. L'output che si ottiene da tale analisi è il seguente:

Function	Description	Operative Phase	Function deviation	Cause	Consequence	F	D	R	Safety-guards	Recommendation

Tabella 4: HAZID Output [16]

La frequenza (F), il danno (D) e il rischio (R) a questo punto sono valutati tramite degli indici qualitativi stimati secondo l'esperienza di chi effettua l'analisi. Come mostrato nella tabella seguente per la frequenza:

F	Annual Frequency	Return Period / Annual Frequency
1	$10^{-6}$ - $10^{-4}$	Extremely improbable: not expected in the system life
2	$10^{-4}$ - $10^{-3}$	Extremely remote: should not occur in system life
3	$10^{-3}$ - $10^{-2}$	Remote: expected few times in the system life
4	$10^{-2}$ - $10^{-1}$	Reasonably probable: expected sometimes in the system life
5	$>10^{-1}$	Frequent: expected several times in the system life

Tabella 5: Classificazione frequenze HAZID [16]

### 1.2.3.2 Individuazione dell'Evento Iniziatore (I.E.)

Alla fine della fase di Hazard Identification, si utilizza una tabella nota come "Matrice di rischio", in grado di classificare il rischio a partire dagli indici qualitativi di frequenza e danno:

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Frequency per year	Severity				
	A	B	C	D	E (highest)
I (highest)					
II					
III					
IV					
V (lowest)					

*Figura 17: Matrice di rischio [20]*

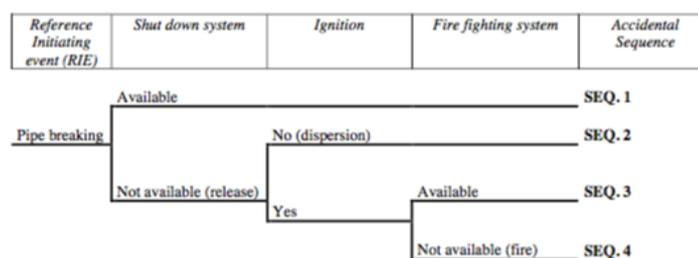
All'interno della matrice si notano tre diverse zone

- Zona di rischio accettabile (verde): in cui le prevenzioni già prese durante la fase di design sono sufficienti a mitigare gli eventuali incidenti;
- Zona ALARP (As Low As Reasonably Practicable) (bianco): e' consigliato effettuare una QRA completa e migliorare il design dei sistemi che ricadono in questa zona;
- Zona di rischio inaccettabile/critica (rosso): è assolutamente obbligatorio effettuare una QRA completa ed è necessario un miglioramento nel design dei sistemi che presentano tale rischio.

Quegli eventi che ricadono nella zona critica vengono raggruppati in classi omogenee (stessa sostanza coinvolta, stesso tipo d'incidente, stessa funzione di sicurezza richiesta per la mitigazione ecc..). Per ognuna di queste classi viene individuato un evento iniziatore (I.E.) che verrà analizzato a fondo attraverso uno studio di tipo QRA. [16]

### 1.2.3.3 Analisi della sequenza incidentale

L'analisi della sequenza incidentale rappresenta il primo step dell'analisi quantitativa. Si studiano la frequenza ed il danno prodotto a partire da ogni evento iniziatore. Ogni singolo evento iniziatore può infatti portare a conseguenze diversi e dunque scenari incidentali diversi. La sequenza incidentale generata si baserà dunque su una struttura ad albero; indentificata una sequenza verranno dunque stimate la probabilità e il danno associato a tale sequenza.



*Figura 18: Event Tree Analysis [16]*

Ottenuta la frequenza di una certa sequenza si costruisce un diagramma logico che permette di individuare le possibili cause che portano alla realizzazione di quella sequenza di eventi (Fault Tree Analysis).

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

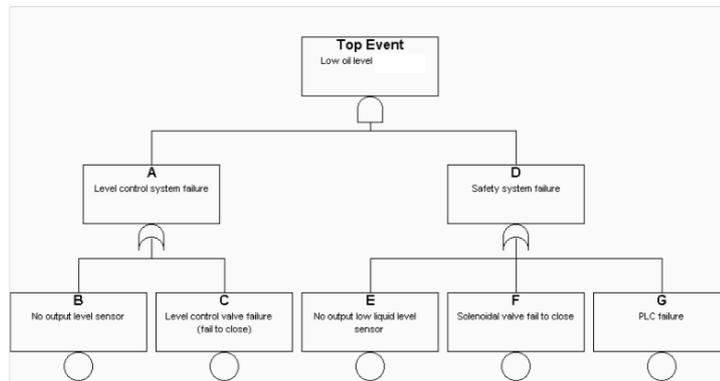


Figura 19: Fault Tree Analysis [16]

### 1.2.3.4 Valutazione del rischio

L'ultima parte dello studio prevede la valutazione del rischio associato ad ogni sequenza incidentale per stabilire se esso potrà essere considerato accettabile o non, a seconda dei limiti di accettabilità imposti, che vengono presentati con un diagramma come quello mostrato nella figura successiva:

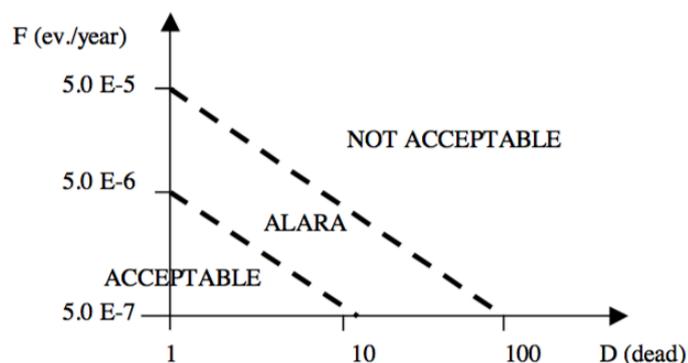


Figura 20: Criteri di accettabilità del rischio [16]

### 1.2.4 Prevenzione del rischio

Lo scopo ultimo della valutazione del rischio è ovviamente la prevenzione di quest'ultimo, la quale viene messa in pratica attraverso una serie di procedure operative, azioni, protocolli o di sistemi di protezione che fungono da barriera protettiva in grado di evitare integralmente o mitigare le possibili conseguenze. Questa serie di azioni prende il nome di barriere; tale nome deriva dal concetto di "difesa in profondità", ben noto nel caso di industrie complesse.

Secondo la terminologia del *Norwegian Oil and Gas Association*, le barriere sono suddivise in 4 livelli:

- Funzioni
- Sistemi
- Elementi
- Fattori influenzanti

Le funzioni sono programmate in modo tale da prevenire o mitigare un eventuale danno. I sistemi sono tutte quelle misure che implementano tali funzioni. Gli elementi sono i

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

componenti delle funzioni e i fattori influenzanti sono appunto quei fattori che influenzano la performance delle funzioni. [18]

Siccome spesso tali barriere possono essere difficili da analizzare, le loro performance sono analizzate tramite i concetti di affidabilità, efficacia e robustezza.

Ad esempio nel caso di un rilascio di idrocarburi, le possibili funzioni da implementare sono quelle illustrate nel seguente diagramma:

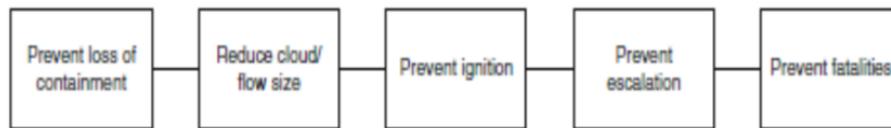


Figura 21: Possibili barriere nel caso di rilascio accidentale [18]

### 1.3 Obiettivi del lavoro

Tale lavoro di tesi va inquadrato in un contesto che mira allo sviluppo di nuovi strumenti che possano essere utilizzati in fase progettuale nell'analisi di rischio per gli impianti offshore. In particolare tali strumenti sono stati sviluppati o sono in fase avanzata di progettazione presso il polo di ricerca del SEADOG, il cui obiettivo è ormai da tempo quello di fornire degli strumenti innovativi che possano migliorare l'analisi di rischio alla base della progettazione di una piattaforma oil&gas. Tali strumenti potranno essere utilizzati nell'analisi delle conseguenze di un rilascio incidentale di gas in pressione, nell'ambito dell'analisi di rischio obbligatoria per ogni piattaforma petrolifera offshore ed in particolare sono in particolare:

- Un modello CFD di rilascio e dispersione "ibrido", che sfrutta l'innovativo concetto di *source box*.
- Un modello che mira all'ottimizzazione dei sensori antigas presenti in piattaforma.

Una volta messi a punto questi modelli, sarà necessario condurre una campagna sperimentale per validarne i risultati e stabilire se effettivamente potranno essere utilizzati come una valida alternativa a quanto già presente nel settore.

Per condurre la campagna sperimentale è necessario disporre di un laboratorio nel quale si possa effettivamente simulare una situazione di rilascio incidentale di gas in modo da poterne analizzare le conseguenze pratiche e confrontarle dunque con quanto previsto dai modelli CFD sviluppati.

Il mio lavoro si è dunque concentrato sulla seconda fase di progettazione preliminare del laboratorio, che segue una prima fase di progettazione fluidodinamica [2] il cui obiettivo è stato quello di riprodurre fedelmente nell'ambiente di prova le condizioni ambientali e fluidodinamiche nelle quali una piattaforma offshore tipo lavora.

Anche se la progettazione fluidodinamica del laboratorio non è oggetto di questo elaborato sarà comunque citata nelle sue parti salienti in quanto punto di partenza di tale tesi.

Per quanto riguarda la fase di progettazione, oggetto di questo elaborato ci si è concentrati in particolare su i seguenti macro obiettivi:

- Dimensionamento del mock-up sperimentale, che fungerà da area di prova per il rilascio;
- Analisi dei possibili gas da utilizzare per le simulazioni di rilascio;

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

- Dimensionamento del sistema di distribuzione del gas, necessario per sostenere il rilascio;
- Definizione e descrizione preliminare delle prove sperimentali
- Definizione della sensoristica sul mock-up sperimentale;

Come primo obiettivo si è voluto innanzitutto progettare il mock-up sperimentale in scala di una piattaforma reale che rappresentasse il più possibile il panorama offshore italiano, base di partenza del progetto.

Dunque dopo un'attenta analisi bibliografica sul panorama offshore e sulle condizioni meteorologiche del Mar Adriatico, sito scelto come riferimento, in quanto luogo con la maggiore densità di installazioni offshore sul suolo italiano, sono state determinate le geometrie da utilizzare per schematizzare la piattaforma. Validato in seguito il corretto fattore di scala del modello con simulazioni di tipo fluidodinamico [2], si è proceduto alla modellazione del prototipo di piattaforma, tramite software di tipo CAD.

In secondo luogo si è dovuto affrontare il problema di come simulare il rilascio di metano, gas scelto come il più rappresentativo degli eventuali rilasci in piattaforma, in quanto per ovvie ragioni di sicurezza sarebbe stato impossibile rilasciare ingenti quantità di gas pericolosi all'interno del laboratorio. Ecco che allora partendo dalle condizioni al contorno di un tipico rilascio di metano, che può avvenire in una piattaforma, quali pressione di rilascio, temperatura e dimensione della rottura è stata effettuata un'attenta analisi dei gas proposti per simulare al meglio il fenomeno.

Individuati i possibili gas da utilizzare si è proceduto con un'analisi dei consumi che ha permesso di valutare il gas da utilizzare in laboratorio. La scelta di quest'ultimo non poteva infatti non prescindere da considerazioni di tipo economico.

Lo step successivo è stato dunque un dimensionamento preliminare dell'impianto di distribuzione del gas, necessario per sostenere le prove. In particolare ci si è focalizzati sulla scelta di un volume polmone che fosse in grado di sostenere il rilascio per tutta la sua durata, e sul dimensionamento del diametro del condotto di rilascio, valutato a partire da un'analisi delle cadute di pressione che si verificano appunto nel tratto che collega il volume polmone con l'ugello. Sono inoltre stati definiti tutti i componenti preliminari che dovranno costituire tale sistema.

Dimensionato l'impianto di distribuzione, si è voluto fornire una prima descrizione generale degli esperimenti che verranno condotti, ed una prima linea guida sulle modalità di gestione di quest'ultimi.

Inoltre una volta fissati il tipo di gas e le condizioni al contorno del rilascio controllato in laboratorio, si è effettuata una simulazione di quest'ultimo con il software commerciale PHAST che ha permesso di stimare il valore di concentrazione del gas sulla pianta del mock-up e a partire da queste considerazioni si è potuto proporre un tipo di sensore che fosse in grado di leggere tali concentrazioni.

Si è infine fornita una prima serie di linee guida per quanto riguarda la gestione del laboratorio, in particolare per quanto riguarda l'area che sarà adibita a stoccaggio gas, e per i sistemi di sicurezza che dovranno essere installati all'interno del laboratorio. In particolare questa serie di considerazioni potranno essere sfruttate come punto di partenza per la fase successiva della progettazione, i cui obiettivi saranno poi illustrati nella lista di progetto che sarà introdotta nel Capitolo 2.

## 2 IL LABORATORIO

Un laboratorio può avere qualsiasi forma e dimensione, potrebbe essere una semplice stanza o un intero impianto. Che si abbia a che fare con una semplice stanza o un intero edificio le problematiche da affrontare nella fase di progettazione di un laboratorio sono le medesime. [21]

Tra le domande più importanti che un progettista dovrebbe porsi possiamo trovare le seguenti:

- Che tipo di attività si svolgeranno nel laboratorio?
- Alcune di queste attività rappresentano un rischio?
- Che tipo di attrezzature sono necessarie?
- Alcune delle attività svolte in laboratorio produrranno eccessive esalazioni, calore, polveri o rumori?
- Alcuni degli obiettivi di queste attività hanno bisogno della presenza di un ambiente controllato?
- Quanto spazio sarà utilizzato per le attrezzature permanentemente installate?
- Sono necessarie particolari prerequisites di sicurezza?

Fare fronte e avere una risposta a domande come quelle sopra riportate fin dalle prime fasi di progettazione risulta essere di estremo aiuto nell'evitare spiacevoli sorprese in una fase successiva del progetto.

E' dunque di fondamentale importanza fare una lista di ogni preciso lavoro che verrà eseguito all'interno del laboratorio durante la fase sperimentale.

Ogni operazione presente sulla lista dovrà poi essere studiata per valutare eventuali problemi che potrebbe creare o particolari accorgimenti che si dovranno prevedere.

### 2.1 Finalità del laboratorio

Il laboratorio che si vuole andare a progettare dovrà ospitare un modello in scala di una piattaforma petrolifera offshore, che fungerà da area di prova per la conduzione di esperimenti di rilascio e dispersione di gas in pressione. Questi esperimenti, come già anticipato, serviranno per analizzare e studiare le conseguenze che può avere un rilascio di questo tipo in un ambiente altamente congestionato come quello preso in analisi. I risultati ottenuti dalla campagna sperimentale potranno poi essere confrontati con quelli ottenuti mediante l'implementazione dei nuovi modelli CFD che attualmente sono in fase di progettazione presso il polo del SEADOG e che sono stati introdotti nel Capitolo 1.

Quello che si vuole andare a creare è dunque un'ambiente di prova che simuli le condizioni ambientali in cui si trova a lavorare un impianto di estrazione offshore, in particolare per quanto riguarda i gradienti di vento che si possono trovare in mare aperto, e questo verrà fatto mediante la creazione di una sorta di galleria del vento nella quale si possa simulare il più fedelmente possibile il flusso di vento desiderato. Il mock-up sperimentale sarà dunque posizionato all'interno di questa galleria in modo da essere investito totalmente dal flusso di vento generato.

All'interno del mock-up saranno presenti vari ostacoli, anch'essi in scala, che rappresentano i vari ingombri e apparecchiature in pressione che si possono trovare in un impianto reale e dai quali potrebbe avvenire il rilascio del gas. La disposizione ed il numero di tali ostacoli non

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

sarà casuale, ma anch'essa dovrà cercare di riprodurre fedelmente il tipo di ingombri che si possono realmente trovare in un impianto oil&gas offshore.

Per simulare il rilascio sarà in particolare necessario un sistema di distribuzione il cui compito sarà quello di trasportare il gas dalla zona prevista per lo stoccaggio delle bombole fino al modello della piattaforma presente nella camera di prova, mediante delle tubazioni, e sostenere quest'ultimo per tutta la durata degli esperimenti.

Sia la progettazione del mock-up che del sistema di distribuzione del gas saranno, in particolare, oggetto del Capitolo 3.

### **2.2 Criteri progettuali**

In questo paragrafo sono introdotti i criteri progettuali alla base della progettazione che hanno condotto alla creazione di una lista di progetto che fungesse da linea guida per le varie fasi della progettazione.

#### **2.2.1 Stima degli spazi**

Una volta stabilito dove verrà costruito il laboratorio, il primo compito da assolvere è capire come sarà utilizzato lo spazio a disposizione.

In particolare risulta fondamentale capire quali spazi all'interno della zona di lavoro saranno occupati dalle strutture fisse e dalla strumentazione. Questo step è di assoluta importanza per ottimizzare gli spazi ed evitare un sovraffollamento di attrezzature che potrebbe avere effetti negativi sulla sicurezza del laboratorio.

Si è già anticipato che all'interno del laboratorio verrà ricreata una galleria del vento che sarà una delle zone principali del laboratorio e nella quale verrà posizionato il mock-up, che dunque sarà di fatto una struttura permanente all'interno della camera di prova; della progettazione di quest'ultima se ne parlerà nel paragrafo 2.4.5. La camera di prova non sarà, ovviamente, l'unica area del laboratorio.

A quest'ultima infatti dovranno essere affiancate almeno altre due importanti zone ovvero

- La zona adibita allo stoccaggio del gas che sarà utilizzato per le prove
- La zona che sarà adibita a sala controllo per il controllo del processo

Ad oggi non avendo una conferma dell'effettivo stabile si può dire poco per quanto riguarda gli effettivi spazi che tali zone occuperanno.

Trattandosi di un laboratorio che avrà a che fare con dei gas in pressione, sarà necessario prevedere, come già anticipato, una zona che venga adibita allo stoccaggio delle bombole in pressione necessarie per gli esperimenti. In particolare la zona stoccaggio dovrà essere separata per questioni di sicurezza, vista la presenza di bombole contenenti gas ad alta pressione, e nel capitolo 3 saranno illustrate alcune linee guida per quanto riguarda tale area nei laboratori. Inoltre all'interno del laboratorio dovrà anche essere previsto uno spazio per ospitare il sistema di distribuzione del gas, in particolare per quanto riguarda il volume polmone che dovrà sostenere il rilascio e che verrà discusso anch'esso nel Capitolo 3.

Per quanto riguarda la sala di controllo, essa ha il duplice obiettivo di raccogliere i risultati delle prove sperimentali e tenere costantemente sotto controllo il processo, in modo da poter intervenire tempestivamente e fermare gli esperimenti qualora si presentasse un qualsiasi problema.

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

L'idea sarebbe quella di avere un'area che abbia visibilità diretta sulla camera di prova magari mediante l'uso di una parete finestra, in modo da avere una visuale chiara dell'esperimento.

### **2.2.2 Considerazioni di sicurezza**

La sicurezza in un laboratorio deve essere un prerequisito basilare. Una volta stabilite le attività che verranno svolte in laboratorio è necessario prevedere uno o più sistemi di sicurezza, in caso di problemi. Ad esempio se si ha a che fare con attività che prevedono l'utilizzo di gas in pressione, come nel nostro caso, sarebbe opportuno come già anticipato che la zona prevista per lo stoccaggio sia in un'area separata rispetto alla zona di lavoro e che i contenitori in cui è contenuto il gas in pressione siano forniti di valvole di sicurezza in modo da poter fare fronte ad eventuali sovrappressioni che potrebbero sfociare in incidenti più o meno gravi.

Un'altra considerazione importante va fatta sulla sicurezza dell'ambiente del laboratorio ed in particolare della camera di prova, soprattutto per quanto riguarda il personale che si occuperà di condurre gli esperimenti. Trattandosi infatti di esperimenti di rilascio di gas, risulta importante che alla fine di ogni sessione sperimentale l'ambiente non sia saturo di gas. Infatti nel caso si utilizzassero dei gas inerti per le simulazioni di rilascio il pericolo sarebbe la formazione di atmosfere povere di ossigeno o nei casi più gravi ad atmosfere asfissianti. Quindi sicuramente si dovranno prevedere dei sistemi di rilevamento dell'ossigeno nella camera di prova ed un adeguato sistema di ventilazione.

### **2.2.3 Considerazioni ambientali**

Durante la fase preliminare della progettazione gli effetti ambientali sono spesso sottovalutati. Si dovrebbe infatti sempre tenere conto dell'ambiente circostante il laboratorio, ad esempio due problemi che spesso non vengono presi in considerazione sono le vibrazioni ed in generale il rumore prodotto dalle apparecchiature presenti.

Nel nostro caso per la creazione delle condizioni ambientali in cui si trova a lavorare una piattaforma offshore, sarà necessario ricreare un flusso di vento che investa la piattaforma e questo verrà fatto mediante l'uso di più ventilatori, come spiegato più avanti nel Capitolo. La presenza di questi ventilatori creerà sicuramente delle vibrazioni non indifferenti e sarà una fonte di rumore, che dovrà essere sicuramente essere analizzata, in primis per capire se la presenza di più ventilatori possa creare un ambiente talmente rumoroso da risultare fuori dai limiti di legge e qualora fosse così si dovrà procedere al dimensionamento di un sistema di abbattimento del rumore, agendo direttamente sui ventilatori oppure agendo con delle opportune schermature del rumore sull'ambiente di prova.

### **2.2.4 Lista di progetto**

Una volta definite le finalità del laboratorio e fatte le dovute considerazioni sulle attività che si svolgeranno al suo interno, il primo passo è stato quello di creare una sorta di lista di progetto che raccogliesse tutti gli step necessari per effettuare una prima progettazione del laboratorio, in modo che si avesse una linea guida chiara da seguire in ogni fase della progettazione. In particolare la lista che è stata sviluppata è riportata di seguito ed è suddivisa in 14 punti salienti:

1. Individuazione delle condizioni ambientali da simulare;
2. Progettazione della camera di prova;
3. Definizione della scalabilità del modello della piattaforma di prova;

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

4. Scelta dei ventilatori per la simulazione del vento;
5. Dimensionamento del mock-up sperimentale;
6. Scelta del gas più opportuno da utilizzare per le simulazioni;
7. Dimensionamento del sistema di distribuzione del gas;
8. Definizione e descrizione preliminare delle prove sperimentali
9. Definizione della sensoristica sul mock-up sperimentale;
10. Dimensionamento dei sistemi di ventilazione per il ricircolo di aria;
11. Dimensionamento dei sistemi di acquisizione dati in sala controllo;
12. Dimensionamento dei sistemi di emergenza;
13. Dimensionamento del sistema antirumore;
14. Dimensionamento del sistema di power supply;

Dalla precedente fase di progettazione fluidodinamica del laboratorio [2] sono stati portati a termine i primi quattro punti della lista sopra citata e saranno riassunti nel proseguo del Capitolo. Mentre i punti 5, 6, 7, 8 e 9 sono stati gli obiettivi fissati per questo elaborato e saranno oggetto di discussione del Capitolo 3. Tutti gli altri punti contenuti in questa lista saranno invece oggetto di discussione di una terza fase progettuale definitiva che poi condurrà alla fase esecutiva del progetto.

### **2.3 Condizioni ambientali da simulare**

Come già anticipato, l'obiettivo della creazione del laboratorio sarà quello di simulare nel modo più accurato possibile un fenomeno di rilascio incidentale di gas in una piattaforma offshore.

In questo paragrafo saranno esposti i criteri decisionali e le considerazioni che hanno condotto alla scelta delle condizioni ambientali da simulare, in particolare per quanto riguarda le condizioni di vento, in quanto quest'ultimo assume un ruolo fondamentale nei fenomeni di dispersione.

Tali considerazioni come si è visto nella lista di progetto sono state il primo punto affrontato in quanto sono state alla base della progettazione fluidodinamica del laboratorio [2].

#### **2.3.1 Il vento**

Il vento non è altro che un movimento di una massa di aria atmosferica da un'area ad alta pressione (anticiclonica) a un'area a bassa pressione (ciclonica). Tale spinta da zone ad alta pressione a zone a bassa pressione è causata da forze di gradiente di tipo termico e appunto di pressione, le quali a loro volta sono generate dalla radiazione solare incidente sulla terra.

La differenza tra l'energia emessa e ricevuta dal sistema terra-atmosfera varia principalmente in funzione della diversa inclinazione del Sole sull'Orizzonte, che causa un'insolazione massima nelle zone Tropico-Equatoriali e minima nelle zone polari.

Nella zona dei tropici mediamente la temperatura risulta essere maggiore rispetto a quella media della terra e questo instaura un regime di bassa pressione, mentre ai poli a causa di una temperatura media minore rispetto alla media terrestre, si creano delle zone ad alta pressione.

Se la temperatura non risentisse di nessun altro fattore la circolazione dell'aria avverrebbe, in ogni emisfero, secondo un'unica cella estesa dai Poli all'Equatore. In realtà questo non è vero a causa delle grandi masse d'acqua, delle zone continentali e delle nuvole. Grazie alla loro distribuzione disomogenea, infatti, si crea in ciascun emisfero un sistema di circolazione tri-cellulare, visibile in Figura 22.

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

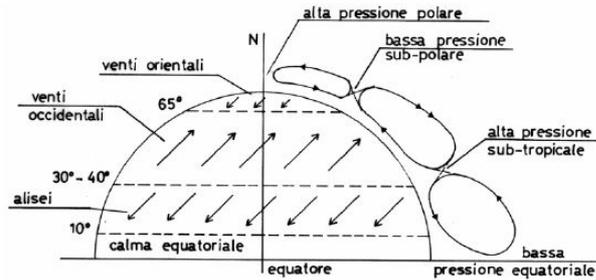


Figura 22: Modello di circolazione tri-cellulare [22]

La circolazione del vento può suddividersi in:

- **Circolazione primaria:** è costituita dai venti superficiali detti “alisei” occidentali o orientali, in funzione della latitudine a cui si sviluppano. Questi sono venti che si sviluppano su periodi mensili o stagionali su aree a scala planetaria. Essi hanno mediamente velocità moderate comprese tra i 4 – 5 [m/s], e sono quelli che determinano il clima terrestre.
- **Circolazione secondaria:** è l’insieme dei venti che si forma nelle zone di alta e bassa pressione, includono i cicloni, gli anti-cicloni e i monsoni e si sviluppano su periodi compresi fra pochi giorni e una settimana. A differenza della circolazione primaria, quella secondaria determina il tempo locale.
- **Venti locali:** sono movimenti di massa d’aria i quali si inseriscono nella circolazione secondaria senza modificarne le caratteristiche. Hanno una estensione limitata e durata breve, ma possono raggiungere velocità elevatissime, come ad esempio le brezze, i venti temporaleschi e i tornado.

Di seguito una tabella che mostra tutti i maggiori fenomeni eolici presenti sulla terra.

Circolazione primaria	Alisei	
	Venti occidentali	
	Venti orientali	
Circolazione secondaria	Cicloni	Extra-tropicali
		Tropicali
	Anti-cicloni	
	Monsoni	
Venti locali	Legati a particolari condizioni geografiche	Brezze
		Föhn
		Venti catabatici (bora, ...)
	Venti legati a particolari condizioni atmosferiche	Venti frontali
		Downburst
		Tornado o tromba d’aria

Tabella 6: Classificazione dei venti [22]

### 2.3.2 Rappresentazione del vento

L’aria in movimento sulla superficie terrestre viene rallentata da quest’ultima ed inoltre subisce un’ulteriore frizione che si genera tra gli stessi profili fluidi che scorrono gli uni sugli altri a velocità differenti. L’unione di questi due fenomeni rende il flusso turbolento, questo accade in una regione determinata dell’atmosfera nota come “Strato limite atmosferico”. Può essere definita una quota  $z_g$  al di sopra della quale la velocità del vento non risente più dell’attrito dovuto dalla terra, essa varia tra 1000 e 3000 m. L’atmosfera al di sopra dello strato limite è nota come “atmosfera indisturbata”.

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

La velocità del vento nell'atmosfera indisturbata è costante mentre nello strato limite atmosferico l'aria risentendo delle forze d'attrito precedentemente accennate sperimenta una riduzione di tale velocità.

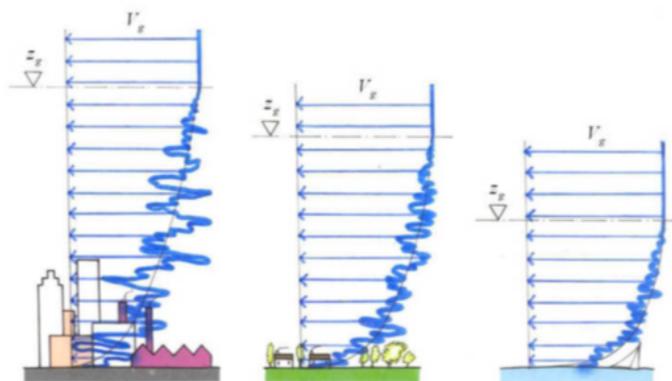
Tale strato è funzione appunto della velocità del vento e della scabrezza del suolo, espressa dal parametro  $z_0$  detto lunghezza di rugosità. Tale  $z_0$  può essere pensato come la dimensione caratteristica dei vortici che si creano a causa dell'interazione tra il suolo e l'aria.

La tabella esposta di seguito, in accordo con l'Eurocodice1 [23], individua quattro diverse categorie di terreno, ognuna caratterizzata da un diverso "fattore di terreno"  $k_T$  che risulta essere proporzionale alla velocità di attrito e aumenta con l'aumentare della rugosità del terreno stesso.

Categoria del terreno		$k_T$	$z_0$ (m)	$z_{min}$ (m)
I	Mare aperto, laghi con minimo 5 km di estensione sopravento e campagna senza ostacoli	0.17	0.01	2
II	Terreno agricolo con recinzioni, piccole fattorie isolate, case o alberi	0.19	0.05	4
III	Aree suburbane o industriali o foreste permanenti	0.22	0.3	8
IV	Area urbana in cui almeno il 15% della superficie sia coperta da edifici la cui altezza media superi i 15m	0.24	1	16

*Tabella 7: Diverse categorie di terreno e relativi parametri [23]*

Si è già detto che lo Strato limite atmosferico si estende fino ad una quota  $z_g$ , e come mostrato nella Figura 23 si nota subito come tale quota  $z_g$  vari al variare del tipo di terreno. Inoltre si può apprezzare come vicino al terreno il profilo di velocità sia molto frastagliato, questo si a causa delle già citate forze di attrito, funzioni a loro volta della scabrezza del suolo, ma anche grazie ad un fenomeno noto come turbolenza atmosferica.



*Figura 23: Profilo di velocità media del vento in siti con diversa rugosità del terreno [23]*

Per definire completamente le proprietà del vento è infatti necessario introdurre due ulteriori concetti: l'equilibrio atmosferico e il significato di velocità media e fluttuazione.

Per equilibrio atmosferico si intende una situazione di equilibrio stabile, instabile o neutrale di una massa d'aria in funzione del gradiente di temperatura verticale che la investe. Nel caso in cui il gradiente sia minore del gradiente adiabatico, o addirittura invertito, si tende alla condizione di equilibrio stabile che non consente la turbolenza (è il caso del fluire di aria calda su un terreno freddo). Al contrario se il gradiente di temperatura è maggiore di quello

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

adiabatico (condizione in cui una massa d'aria fredda fluisce su un terreno caldo), il riscaldamento dal basso provoca un'atmosfera instabile ed esalta la turbolenza. Al crescere della velocità del vento il gradiente termico tende al gradiente adiabatico causa l'elevato rimescolamento dell'aria, si raggiunge la stabilità neutrale e la velocità del vento risulta indipendente dalla temperatura.

Il secondo concetto è l'analisi della velocità del vento. Essa può essere scomposta in due diversi contributi: la velocità media e la fluttuazione turbolenta. Per fare ciò si prende in esame un arco temporale lungo e si misura lo spettro della potenza del vento in funzione della frequenza, tale rappresentazione è conosciuta come lo spettro di Van der Hoven e riassume i vari fenomeni coinvolti nella circolazione atmosferica

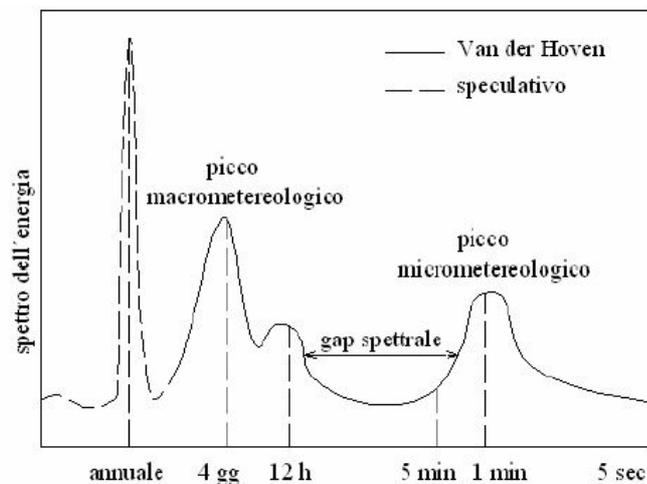


Figura 24: Spettro di Van der Hoven

Nella zona delle basse frequenze (mensili o annuali) si hanno i fenomeni macro meteorologici i quali hanno due picchi che rappresentano i fenomeni eolici. Alle alte frequenze è possibile notare un secondo picco importante, noto come picco micrometeorologico, che si riferisce a fenomeni della durata di pochi minuti, ed è da attribuire ai fenomeni di turbolenza atmosferica. Lo spettro non è altro che una misura della varianza statistica del vento turbolento, e tale varianza risulta nulla in un periodo che va da 10 minuti ad un'ora, noto come gap spettrale e fornisce informazioni utili per quanto riguarda la velocità del sito d'interesse, data l'assenza di picchi.

Data la stazionarietà della velocità media all'interno del gap spettrale, è possibile considerare la componente fluttuante longitudinale del vento come somma del valor medio ottenuto su un periodo di 10-60 minuti e della componente fluttuante di origine turbolenta.

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

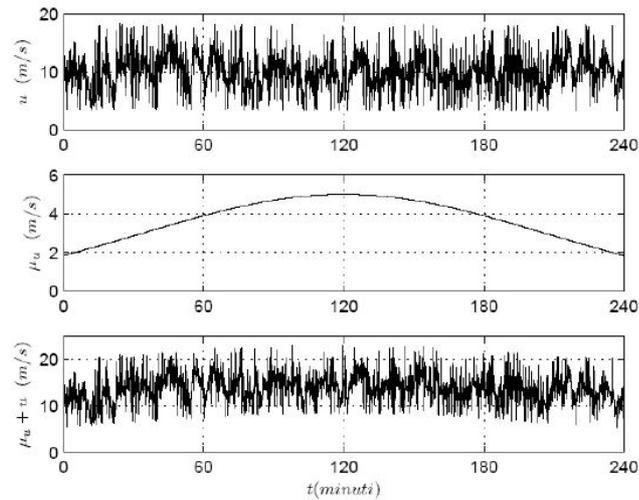


Figura 25: Suddivisione della componente longitudinale della velocità del vento

### 2.3.3 Caratteristiche del vento nel Mar Adriatico

Avendo scelto come principale sito di interesse il Mar Adriatico, in quanto, luogo con maggiore densità di installazioni offshore, sono stati analizzati i principali parametri precedentemente definiti riguardo le caratteristiche del vento, ovvero direzione e velocità media. In Figura 26 è possibile apprezzare la velocità media annua sulle coste italiane ad un'altezza di 50 metri sul livello del mare.

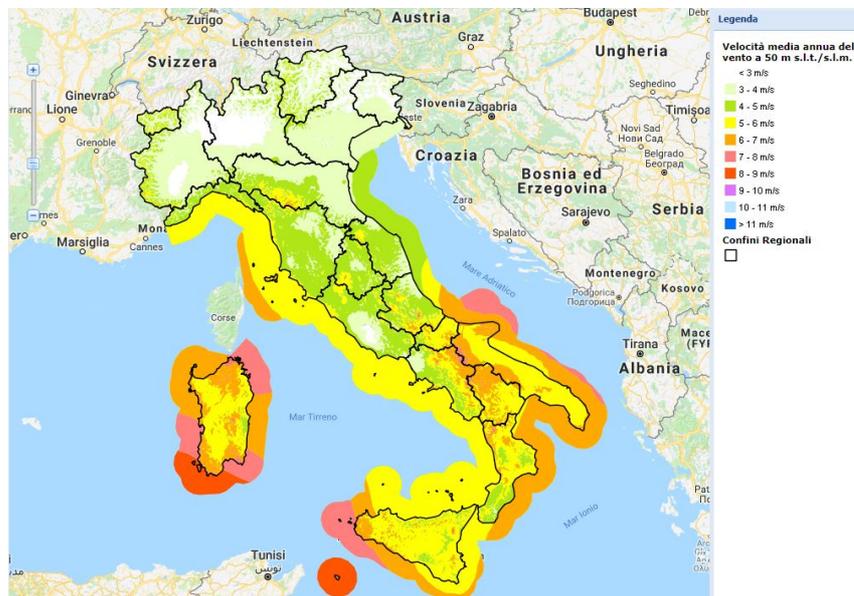


Figura 26: Mappa velocità media del vento sulle coste italiane [24]

Si può subito apprezzare dall'immagine, che la colorazione del sito d'interesse passa dal verde all'arancione, con qualche zona in rosa. Seguendo la legenda riportata, tale cambiamento cromatico è interpretabile come una variazione della velocità del vento che mediamente va dai 4 m/s ai 7-8 m/s, mentre, per quanto riguarda la direzione del vento, sono state selezionate tre stazioni meteorologiche distribuite lungo la costa adriatica, in particolare, Ravenna Punta Marina, Rimini Marecchia e Pineto.

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore



Figura 27: Distribuzione del vento: in alto a sinistra Ravenna Punta Marina, in alto a destra Rimini Marecchia, in basso Pineto [25]

Dalla Figura 27 si nota subito come le direzioni medie del vento varino molto al variare della latitudine, ma si può affermare tranquillamente che le direzioni principali vanno da Est a Nord-Est.

### 2.4 Progettazione fluidodinamica del laboratorio

Il seguente paragrafo riassumerà invece i restanti punti della lista progetto che sono stati affrontati durante la fase di progettazione fluidodinamica e che hanno condotto in particolare ai seguenti risultati:

- Progettazione della camera di prova (Galleria del vento)
- Definizione del fattore di scala del mock.up sperimentale
- Dimensionamento e proposta dei ventilatori per la simulazione del vento

#### 2.4.1 Geometria ipotizzata del laboratorio

Al momento è stata individuata un'area che potrebbe essere potenzialmente utilizzata come laboratorio per le attività sperimentali, per cui a questo punto della progettazione si conoscono solamente dei dati molto generali, che saranno poi definiti meglio in una seconda fase quando tale area verrà eventualmente confermata.

L'ipotetico stabile individuato come possibile laboratorio ha una superficie pari a 128 m<sup>2</sup> ed un volume complessivo di 1280 m<sup>3</sup>. Le dimensioni caratteristiche sono riportate nella Tabella 8

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Dimensioni del laboratorio		
Lunghezza	16	m
Larghezza	8	m
Altezza	10	m

Tabella 8: Dimensioni Laboratorio ipotizzate

Le dimensioni sopra riportate non sono altro che le dimensioni dell'area del laboratorio all'interno della quale si ricaverà la camera di prova in cui effettivamente saranno condotti gli esperimenti e nella quale si vuole realizzare la galleria del vento.

#### 2.4.2 La galleria del vento

Descritta la geometria base del laboratorio, quello che si è voluto ottenere dalla progettazione di quest'ultimo è una sorta di galleria del vento, che simulasse appunto le condizioni di vento richieste.

Le gallerie del vento sono uno strumento fondamentale nel settore aerospaziale, in quanto permettono di effettuare misurazioni su modelli in scala delle principali caratteristiche aerodinamiche necessarie per la corretta progettazione dei profili alari e non solo.

Detto ciò il primo problema che è stato necessario risolvere è stato appunto trovare la corretta similitudine tra il caso reale e le condizioni in laboratorio.

I parametri che di solito vengono utilizzati per le simulazioni in similitudine sono tre:

- **Numero di Reynolds:** viene applicato per fluidi viscosi e incompressibili, quindi in campi di moto nettamente subsonici.
- **Numero di Mach:** ha applicazioni per campi di velocità transonici, supersonici o ipersonici dove la comprimibilità del fluido non risulta più trascurabile.
- **Numero di Froude:** riguarda lo studio di fluidi pesanti e dunque più utilizzato in idrodinamica.

Esistono diverse tipologie costruttive di gallerie del vento, che dipendono fortemente dal campo di moto che si vuole ricreare e dal tipo di funzionamento. Fondamentalmente ci sono quattro macro categorie, ognuna corrispondente alla tipologia di flusso che si vuole rappresentare: gallerie subsoniche, gallerie transoniche, gallerie supersoniche e gallerie ipersoniche.

Date le velocità in gioco, nel nostro caso ricadiamo in un campo di moto subsonico e dunque la galleria che si andrà a costruire sarà una galleria subsonica, ovvero una galleria in cui i flussi simulati sono inferiori o molto inferiori di 0.75 Mach che è considerata la soglia di passaggio ad un flusso transonico.

Gli elementi costitutivi di una galleria classica sono i seguenti:

- **Condotto convergente:** Primo elemento della galleria del vento poiché in esso l'aria accelera ed inoltre viene limitata la turbolenza poiché grazie al gradiente di pressione negativo, lo strato limite tende a schiacciarsi contro le sue pareti.
- **Camera di prova:** è il segmento a sezione costante della galleria, in essa l'aria raggiunge la velocità massima ed è la zona in cui è posizionato il modello e in cui vengono effettuate le misurazioni sperimentali. Un parametro importante è che il

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

modello deve avere una sezione frontale piccola rispetto alla sezione della camera di prova per evitare fenomeni di bloccaggio o interferenza di parete.

- **Diffusore:** è la parte terminale della galleria del vento, ha una sezione divergente ed in esso l'aria viene decelerata. A causa del gradiente di pressione positivo che si instaura, l'angolo di divergenza ammissibile per evitare le turbolenze a valle è dell'ordine di 2 o 3 gradi [26].
- **Ventilatore:** ha il compito di trasferire l'energia cinetica del motore che lo alimenta al fluido sotto forma di energia di pressione.
- **Altro:** Altri elementi necessari alla realizzazione della galleria, quali sagomature per le possibili curve, reti anti-turbolenza etc.

Esistono essenzialmente quattro tipologie costruttive di galleria del vento subsonica [27] e si caratterizzano dalla tipologia di circuito (se aperto o chiuso) e dalla tipologia di camera di prova (se aperta o chiusa). Tali tipologie sono state raggruppate nella Tabella 9.

TIPOLOGIE GALLERIA DEL VENTO SUBSONICA				
	CIRCUITO		CAMERA PROVA	
	Aperto	Chiuso	Aperta	Chiusa
<b>Eiffel</b>	X		X	
<b>NPL</b>	X			X
<b>Prandtl</b>		X	X	
<b>Moderna</b>		X		X

Tabella 9: Tipologie costruttive di galleria del vento subsonica

### 2.4.3 Scalabilità del modello

Considerando le dimensioni geometriche del laboratorio selezionato, e tenendo conto delle dimensioni medie di un'installazione off-shore, è evidente che risulta necessario realizzare un modello in scala della piattaforma di prova che verrà immersa nel flusso d'aria. Per ottenere una scalatura del modello che sia ottimale è necessario determinare dei parametri rispetto ai quali scalare il prototipo con l'obiettivo di far rimanere invariata il comportamento aerodinamico dell'oggetto.

Ci si deve preoccupare che, modificando le dimensioni del prototipo della piattaforma, lo sviluppo dei profili di velocità del vento che la investono rimangano inalterati o quanto meno simili a quelli reali.

Per effettuare questo studio verrà usata l'analisi dimensionale, tecnica che servirà a stabilire le condizioni affinché i campi di moto siano simili, requisito necessario per poter estendere i risultati ottenuti sul prototipo anche sulle piattaforme reali. Tale tecnica si basa esclusivamente sul teorema del Pi-greco o teorema di Buckingham [29] il quale afferma: *“Dato un processo fisico descritto da una equazione anche indefinita nella sua forma analitica, nella quale compaiano n variabili fisiche, se le grandezze fondamentali (cioè indipendenti tra loro e in numero sufficiente a descrivere compiutamente lo spazio dimensionale di interesse) di queste n variabili sono k (ad esempio, massa, lunghezza, tempo in un problema puramente meccanico), allora il problema può essere espresso in funzione di n-k gruppi adimensionali.”*

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Al fine di determinare i parametri che assicurano la similitudine dei campi di moto bisogna effettuare degli step.

- **Similitudine geometrica**

Due regioni 1 e 2 dello spazio, sono dette in similitudine geometrica se il rapporto fra le distanze di due punti generici  $A_1, B_1$  nella configurazione 1 e  $A_2, B_2$  nella configurazione 2 è costante.

$$\frac{A_1B_1}{A_2B_2} = k_g \quad (2)$$

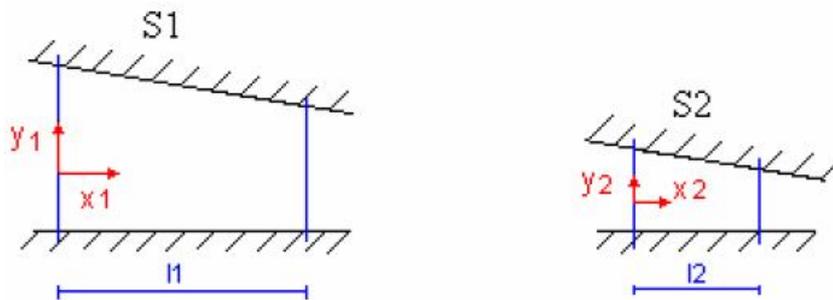


Figura 28: Similitudine geometrica

- **Similitudine cinematica**

Si ha similitudine cinematica se i regimi di velocità nel modello in scala e nel sistema reale, ovvero le loro linee di flusso, sono simili. Considerando oltre alle variabili spaziali anche quella temporale, se  $A_1$  dopo un certo tempo  $T_1$  va a finire in un punto  $A'_1$ , e il punto  $A_2$  (che è il corrispondente del punto  $A_1$  in similitudine geometrica) dopo un certo tempo  $T_2$  va a finire in  $A'_2$ , i punti percorrono linee di corrente simili. Nell'ipotesi che  $A_1$  e  $A'_1$  siano infinitamente vicini avremo che:

$$c_1 = \frac{A_1A'_1}{T_1} \quad c_2 = \frac{A_2A'_2}{T_2} \quad (3)$$

Essendo vera la relazione:

$$\frac{T_2}{T_1} = k_t \quad (4)$$

Si ottiene che i moduli delle velocità di due configurazioni in similitudine cinematica sono in un rapporto costante

$$\frac{c_2}{c_1} = k_v = k_g k_t^{-1} \quad (5)$$

- **Similitudine dinamica**

Si dice che un campo di moto 1 sia in similitudine dinamica con un campo di moto 2 se si ottiene da quest'ultimo moltiplicando le lunghezze per un rapporto costante  $k_g$ , i tempi per un rapporto costante  $k_t$  e le masse per un rapporto costante.

$$\frac{M_2}{M_1} = k_m \quad (6)$$

La similitudine dinamica dunque presuppone quella geometrica e quella cinematica. Come conseguenza dell'analisi dimensionale, in fluidodinamica, il parametro di similitudine caratteristico nel caso di fluidi viscosi incomprimibili (come nel caso dell'aria per velocità inferiori a 0.3 Mach) è il numero di Reynolds. Per mantenere la similitudine dinamica e dunque fluidodinamica è sufficiente mantenere costante il numero di Reynolds e assicurare la similitudine geometrica del prototipo. È stato dimostrato però che per Reynolds maggiori di  $10^4$ - $10^5$ , ovvero in condizioni di moto completamente turbolento, il comportamento del fluido diventa costante ed indipendente dal rapporto tra forze viscosi e d'inerzia. Da uno studio effettuato da ENEA in collaborazione con il MISE sulla riduzione in scala di un prototipo di un bruciatore [29], è emerso che un criterio per conservare il comportamento fluidodinamico in condizioni di flusso completamente turbolento è quello di mantenere costante le velocità dei flussi in ingresso.

Questo è stato dunque l'approccio che si è deciso di seguire: individuare una velocità del vento rappresentativa del fenomeno nella realtà, e mantenerla uguale anche nell'ambiente del laboratorio. Sono dunque state effettuate delle prove CFD per verificare che questo approccio fosse corretto.

#### **2.4.4 Le prove CFD**

Di seguito saranno descritte brevemente le principali prove CFD [2] che hanno condotto alla scala da utilizzare per il modello. Tali prove sono state effettuate con un modello di piattaforma di prova che fosse il più simile possibile al mock-up finale, che verrà descritto nel Capitolo 3. La cosa fondamentale a questo punto della progettazione era infatti accertarsi che la scala 1:10, scelta per riscalare il modello reale, fosse sufficiente per permettere un completo sviluppo dei profili del vento attorno al mock-up e all'interno dei deck di quest'ultimo.

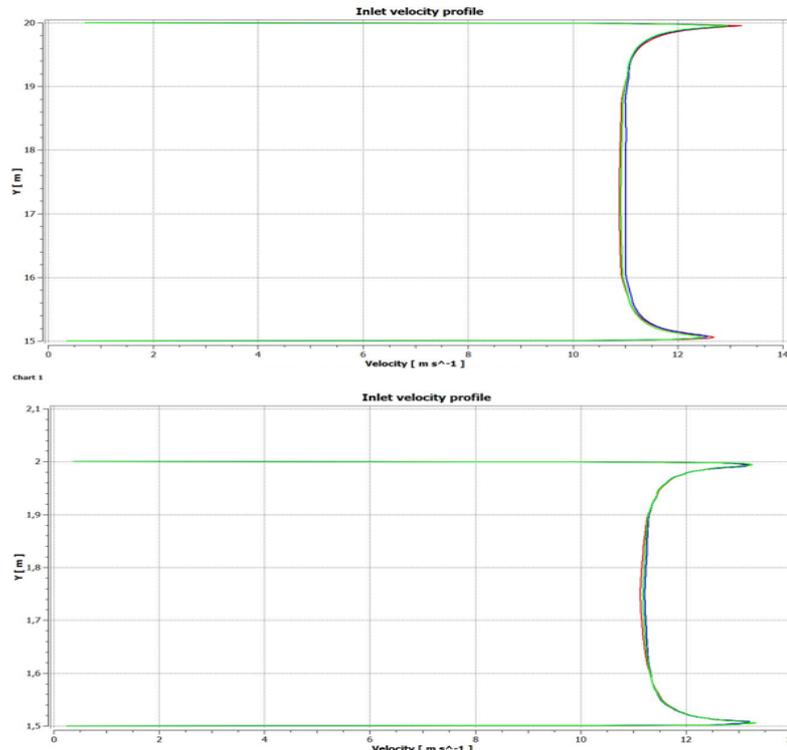
La scala è stata scelta tenendo conto di due fattori contrastanti: il primo è quello fluidodinamico, ovvero ponendo attenzione alle dimensioni complessive del laboratorio, onde evitare fenomeni di interferenza con le pareti laterali, con il pavimento e il soffitto. Seguendo questa linea progettuale, la scala avrebbe dovuto essere ridotta ancora per favorire l'evoluzione dei profili di velocità attorno alla struttura. Il secondo è di natura tecnica, il modello non essendo realizzato al fine di verificare la sua risposta aerodinamica, bensì come area di studio di fenomeni di dispersione, ridurre eccessivamente la scala avrebbe reso molto difficile l'allestimento del mock-up della piattaforma necessario per condurre le prove.

Dalle analisi fluidodinamiche condotte [2] è emerso che al fine di poter estendere alle piattaforme reali, le prove sperimentali effettuate su modelli in scala fosse necessario mantenere inalterate le condizioni fluidodinamiche nelle due configurazioni. Questo, come anticipato, è possibile attraverso l'applicazione del teorema di Buckingham e rispettando le similitudini geometriche cinematiche e dinamiche. In particolare per fluidi in regimi di moto completamente turbolento ovvero con Reynolds maggiori di  $10^5$  è sufficiente mantenere

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

costante la velocità d'immissione del flusso d'aria purché si rimanga nel campo del completamente turbolento.

Le figure seguenti mostrano infatti i profili di vento che si sviluppano nella zona compresa tra due deck. In particolare in ognuna delle due figure sono mostrate più curve che rappresentano i diversi modelli fluidodinamici utilizzati. Si osserva dai risultati sia per il caso reale, quindi con distanza interdeck di 5 [m], che per il caso in laboratorio, quindi con distanza interdeck di 0,5 [m] che tale criterio è applicabile è, infatti, chiaramente visibile la sovrapposibilità dei profili.[2]



*Figura 29: Profili di velocità del flusso di aria immesso (In alto per una geometria reale, in basso per una geometria in scala 1:10) [2]*

Appurato dunque che la scala andasse bene si è in seguito fissato un range di velocità che fosse rappresentativo del fenomeno che si voleva investigare; nel paragrafo 2.3.3 è stata mostrata, a questo proposito, la mappa delle velocità del vento lungo le coste italiane e si è visto che nel Mar Adriatico, scelto come sito di analisi, le velocità sono comprese in un range 4-8 m/s. Ecco che dunque si è fissato un range tra i 5-7 m/s come velocità di progetto e si è proceduto con le altre prove CFD per la determinazione del layout finale del laboratorio [2].

### 2.4.5 Layout finale della camera di prova

Sono state condotte varie prove che alla fine hanno portato al layout finale dell'ipotetico laboratorio. [2]

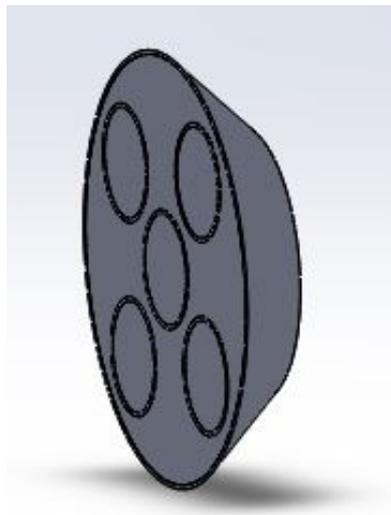
Per gli scopi della progettazione è stato utilizzato come riferimento costruttivo una tipologia di galleria del vento di tipo "Eiffel" ovvero quella che presenta sia il circuito che la camera di prova aperta.

Per simulare il flusso d'ingresso dell'aria sono stati modellati 5 ventilatori con diametro pari a 1,00 m e posizionati in modo tale da essere iscritti in una sezione che li contenesse. L'area di

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

immissione dell'aria è stata invece modellata come un cilindro di raggio 3 [m], e la lunghezza del condotto è stata fissata a 3 [m], poiché il flusso creato dall'interazione dei 5 ventilatori necessita di più spazio per ridurre la sua turbolenza e tendere al flusso omogeneo. Il valore di 3 [m] di lunghezza del condotto è stata scelta come ottimo tra omogeneità parziale del flusso ottenuta e spazio libero necessario tra l'uscita del condotto e la parete forata della camera di ristagno. [2]

Per quanto riguarda il condotto di immissione dell'aria che contiene i 5 ventilatori, esso ha un diametro maggiore rispetto alla parte circolare del condotto e pari a 4.9 [m]. Tale dimensione è necessaria infatti a contenere la somma delle superfici dei 5 ventilatori in modo tale da generare un condotto convergente (Figura 30) che, come descritto, è alla base della struttura delle gallerie del vento. L'angolo di convergenza del condotto è di  $43^\circ$ .



*Figura 30: Sezione del condotto convergente di immissione dell'aria [2]*

E' stato inoltre realizzato un divisorio posizionato a circa 3 metri dalla parete di fondo del laboratorio. Tale divisorio presenta un foro della stessa grandezza del condotto d'ingresso ed è posizionato all'altezza dell'asse del condotto stesso. L'obiettivo di tale divisorio era quello di realizzare una camera di ristagno della turbolenza, la quale risultava generata dall'interazione tra il flusso d'aria e la parete finale del laboratorio. Tale camera permette al flusso d'aria di entrare ma non consente alla turbolenza generata a valle della stessa di tornare indietro ed interessare nuovamente il volume di laboratorio nel quale è presente la piattaforma.

Sulla parete laterale della camera di ristagno sono state realizzate tre aperture quadrate di superficie pari a  $1 \text{ [m}^2\text{]}$ . Queste aperture rappresentano le bocchette di estrazione tramite cui la turbolenza intrappolata può uscire e venire sfogata attraverso l'intercapedine all'esterno. La somma della superficie delle tre bocchette d'estrazione è leggermente inferiore alla superficie del condotto d'immissione, questo causerà un aumento di velocità localizzato ma un ulteriore ingrandimento di tali aperture avrebbe rischiato di compromettere l'integrità strutturale della parete di contatto tra laboratorio e intercapedine.

Nella configurazione è stata anche prevista una seconda parete divisoria che separa la zona di aspirazione dei ventilatori da quella di mandata.

In questo modo è stato possibile semplificare la geometria trascurando ciò che accade nella zona a monte dei ventilatori poiché non è inerente all'esito delle simulazioni.

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Una volta fissata la corretta scalatura del modello, ed impostati su software appositi i parametri per le prove, si è potuto appurare che i profili di velocità del flusso immesso fossero simili e confrontabili [2] questo ha permesso di confermare la configurazione precedentemente descritta che ha dunque confermato la geometria del laboratorio con doppia parete divisoria e cinque ventilatori di diametro 1 [m] inscritti in una sezione circolare di diametro 4,9 [m] che poi si restringe a 3 [m].

La Figura 31 mostra tale configurazione:

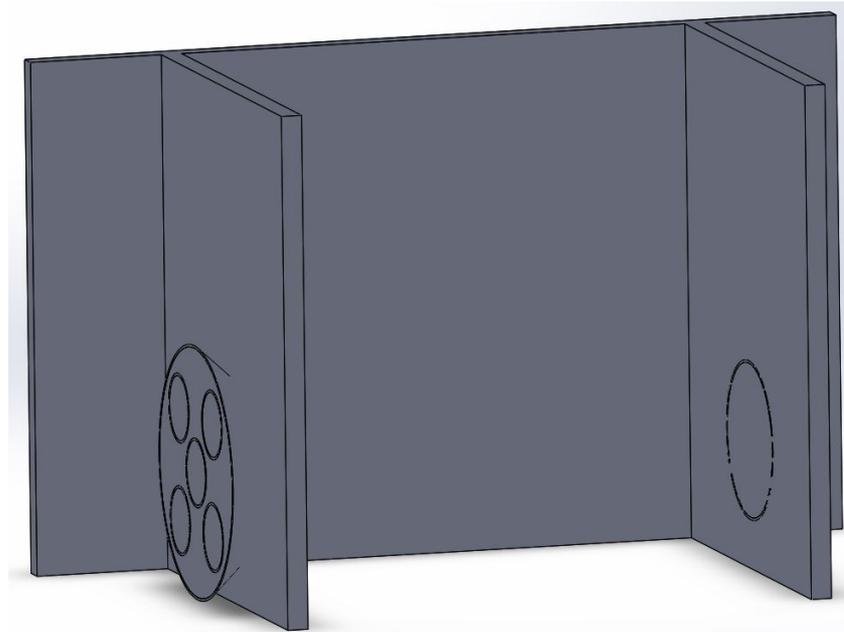


Figura 31: Layout finale del laboratorio con doppia parete divisoria [2]

Per quanto riguarda i ventilatori, la scelta è ricaduta su un modello assiale. Si è preferito un modello assiale ad uno centrifugo in quanto la portata da gestire era elevata e la pressione da applicare al fluido bassa. Inoltre essendo i 5 ventilatori montati in parallelo era necessario che non fossero troppo ingombranti, e un ventilatore assiale in genere ha un ingombro medio minore rispetto ad uno di tipo centrifugo.

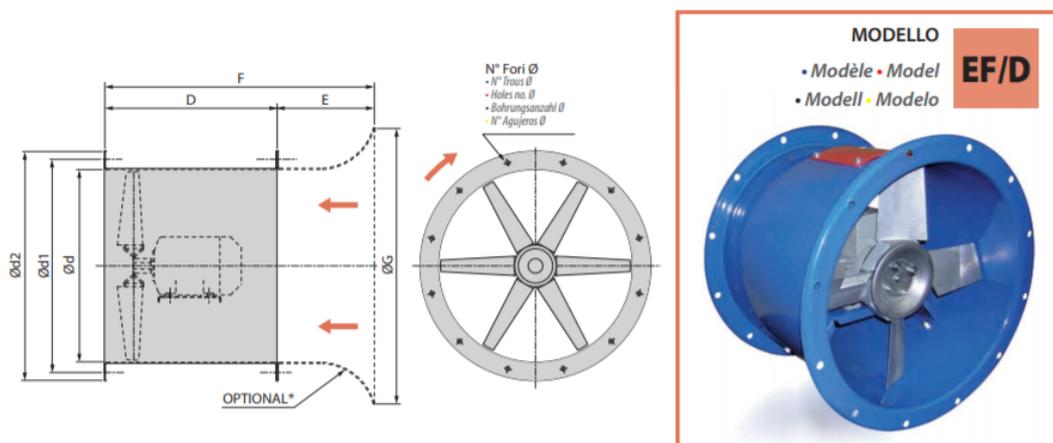


Figura 32: Modello ventilatore assiale [2]

Ogni singolo ventilatore sarà in grado di fornire le seguenti portate volumetriche esposte in Tabella 10, a seconda della velocità del vento che si vuole simulare:

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci  
accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

<b>RANGE DI FUNZIONAMENTO DEL VENTILATORE</b>	
<b>VELOCITÀ [m/s]</b>	<b>PORTATA [<math>m^3/s</math>]</b>
5	7.1
6	8.5
7	10

*Tabella 10: Range di funzionamento dei singoli ventilatori [2]*

Terminata dunque la fase di progettazione fluidodinamica che ha portato a fissare le dimensioni della camera, le velocità e le direzioni principali del vento da riprodurre ed il numero e il tipo di ventilatori necessari allo scopo, si è andati avanti con gli obiettivi esposti nella lista di progetto e dunque con la seconda fase di progettazione, oggetto di questo elaborato.

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci  
accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

### 3 LA PROGETTAZIONE

Il seguente capitolo si propone come obiettivo quello di descrivere la seconda fase progettuale del laboratorio, che riassume i seguenti punti della lista progetto riportata nel paragrafo 2.2.4 e che sono riportati qui di seguito:

- Dimensionamento del mock-up sperimentale;
- Scelta del gas più opportuno da utilizzare per le simulazioni;
- Dimensionamento del sistema di distribuzione del gas;
- Definizione e descrizione preliminare delle prove sperimentali
- Definizione della sensoristica sul mock-up sperimentale;

Per quanto riguarda il primo punto di questa lista, quindi il dimensionamento del mock-up sperimentale, si è partiti innanzitutto da un'analisi delle piattaforme offshore presenti nel panorama italiano; e grazie alle simulazioni fluidodinamiche [2] che hanno permesso di stabilire il corretto fattore di scala ed altre valutazioni di carattere progettuale si è riusciti a modellare il prototipo.

Il secondo punto della lista è stato il più oneroso, in quanto in prima battuta sono stati proposti dei gas puri ed una miscela che andassero bene per l'utilizzo in laboratorio, soprattutto dal punto di vista della sicurezza. Proposti i gas, sono stati scelti i parametri di un classico rilascio reale in piattaforma, e grazie a questi sono state condotte le simulazioni di un rilascio in pressione "reale". Tali simulazioni hanno permesso di effettuare una prima scrematura di tutti i gas proposti al punto precedente. A questo punto del percorso sono poi stati definiti i parametri di rilascio da utilizzare all'interno del laboratorio, e sono state condotte delle simulazioni di rilascio con questi parametri per i gas candidati rimasti dalla precedente fase. Ottenuti gli output delle simulazioni di rilascio in laboratorio è stata effettuata un'analisi dei consumi per scegliere definitivamente il tipo di gas che sarà utilizzato per la campagna sperimentale.

Una volta scelto il gas che sarà usato per gli esperimenti, si è andati avanti dimensionando in prima battuta il sistema di distribuzione del gas, che si occuperà di trasportare appunto il gas dalla zona di stoccaggio fino al rilascio nell'ambiente di prova. In particolare oltre ad una descrizione generale dell'impianto e dei suoi componenti principali, è stato dimensionato un volume polmone intermedio in grado di sostenere il rilascio per tutta la sua durata, ed è stata effettuata un'analisi delle cadute di pressione nel tratto finale dell'impianto per dimensionare il condotto che collega il volume polmone fino all'ugello finale.

Per quanto riguarda il terzo punto della lista, in base alle considerazioni dei punti precedenti è stata descritta una prima procedura che indica come dovranno essere condotte le prove.

Infine per la definizione della sensoristica da utilizzare sul mock-up sperimentale, sono state ricondotte le simulazioni del rilascio in laboratorio con il programma commerciale PHAST, che ha permesso un'analisi delle concentrazioni del gas rilasciato. Grazie a queste analisi è stato possibile proporre dei sensori opportuni per leggere tali concentrazioni ed è stato verificato che tali concentrazioni fossero rintracciabili su tutta la pianta del mock-up proposta.

Oltre alla descrizione dei punti sopracitati in una fase finale del capitolo saranno inoltre fornite una serie di linee guida per la gestione del laboratorio, soprattutto per quanto riguarda la zona di stoccaggio del gas ed una prima serie di considerazioni di sicurezza, che potranno essere di aiuto durante la fase di dimensionamento di tali sistemi.

### **3.1 Dimensionamento del mock-up sperimentale**

Nel capitolo 2 si è discusso dei criteri alla base della creazione dell'ambiente di lavoro in cui effettuare le prove sperimentali di rilascio. Dopo attente valutazioni e studi sulle condizioni ambientali presenti nel mar Adriatico, che come già anticipato è il luogo scelto come principale sito d'interesse, sono state trovate quelle più rappresentative che permettessero di simulare in maniera più generale possibile le condizioni meteo marine che si hanno nell'offshore italiano.

Un discorso analogo può essere fatto per le scelte decisionali alla base della modellazione del prototipo di piattaforma che sarà installato nella camera di prova della galleria del vento descritta nel capitolo precedente e dunque investito dal flusso di vento simulato.

Appurato che una scalatura del modello reale di 1:10 permette un corretto sviluppo dei profili di vento simulati all'interno dei deck della piattaforma, le dimensioni caratteristiche di quest'ultima sono state scelte considerando un ottimo tra le reali dimensioni medie delle piattaforme nel mar Adriatico, le necessità di costruire un modello che non sia troppo complicato, ma soprattutto i vincoli progettuali imposti dallo spazio a disposizione.

#### **3.1.1 La struttura**

Nel paragrafo 1.1.6.1 è stato già discusso di come a causa della bassa profondità delle acque del mar Adriatico le due strutture principali utilizzate per la costruzione dei complessi offshore ivi presenti, sono di tipo fisso con struttura reticolare in acciaio a 8 gambe (42%) o a 4 gambe (37%). Ci è dunque sembrato ovvio, in sede di progettazione, che la struttura da realizzare non potesse discostarsi da una di queste due configurazioni, ed in particolare si è optato per una struttura a 4 gambe, in quanto rappresenta appunto un ottimo tra la situazione da rappresentare e la semplicità realizzativa.

Va inoltre considerato che la zona strutturale a supporto della piattaforma non risulta essere di fondamentale importanza per gli scopi del nostro lavoro, in quanto in caso di rilascio incidentale di gas questa zona della piattaforma non risulta essere interessata dal fenomeno ed è proprio per questo motivo che all'interno del laboratorio la parte del prototipo relativo alla struttura non sarà investita dal flusso di vento simulato dai ventilatori.

Nel paragrafo 2.3.3 dove sono state discusse le caratteristiche del vento nel mar Adriatico per quanto riguarda la velocità e la direzione, si è visto come la distribuzione di quest'ultima sia parecchio variabile. Per questo motivo, anche se come direzioni principali sono state individuate quelle che vanno da Nord a Nord-Est, con l'obiettivo di coprire un più ampio spettro di direzioni, non potendo ruotare i ventilatori e quindi non potendo direttamente muovere il flusso di aria si è deciso di porre l'intera struttura del modello su un piano ancorato al suolo ma ruotabile per mezzo di un sistema motorizzato. In questo modo si potranno simulare varie direzioni del vento ruotando semplicemente il mock-up.

#### **3.1.2 Modello della piattaforma**

Per quanto riguarda le dimensioni del modello, analizzando le dimensioni delle varie piattaforme italiane dal report prodotto dal MISE [11] si è visto come le dimensioni della pianta di quest'ultime siano molto diverse tra di loro e che mediamente esse presentano 3 deck. Per ridurre il bacino di scelta ci si è dunque focalizzati su quelle strutture che presentano tale numero di deck e la struttura portante discussa in precedenza (reticolare a 4 gambe). Tra

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci  
accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

queste la più piccola risulta essere l'AMELIA C con una pianta quadrata di 13 [m] x 13 [m] che estrae gas e presenta ben 12 pozzi allacciati.



*Figura 33: AMELIA C [11]*

Mentre la più grossa è la NAOMI PANDORA con la sua imponente pianta di 48 [m] x 49 [m] ed anch'essa estrae gas naturale.



*Figura 34: NAOMI PANDORA [11]*

A fronte di queste premesse e considerando che la sezione d'immissione dell'aria ha un diametro di 3 [m] si è cercato di trovare un ottimo tra le dimensioni medie delle piattaforme e la volontà di mantenere tutto il prototipo all'interno della sezione d'immissione del flusso.

Con questo obiettivo si è dunque optato per una pianta reale di 30 [m] x 20 [m] che a fronte di una scalatura di 1:10 in laboratorio si otterrà un prototipo con pianta 3 [m] x 2 [m], che risulta dunque perfettamente investito dal flusso di vento simulato, uscente da una sezione con diametro di 3 [m]. Inoltre per quanto riguarda la distanza tra un deck ed il successivo è stata fissata a 5 [m] nel modello reale. Si consideri che normalmente nelle piattaforme offshore tale distanza risulta compresa tra i 5 e i 7 [m], ma considerando l'altezza del ventilatore si è preferito fissarla a 5 [m] e di conseguenza a 0,5 [m] nel mock-up.

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci  
accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Per quanto riguarda il numero di deck, si è già detto che essi saranno 3 ed in particolare da quello più in basso a quello più in alto:

- **Cellar Deck:** E' la zona della piattaforma che si trova più in basso, in quest'area sono presenti tutti i macchinari di supporto alla perforazione ed estrazione ed eventuali serbatoi a basse e medie pressioni. Contiene inoltre una serie di macchinari per effettuare un primo trattamento del greggio estratto.
- **Production Deck:** E' l'area della piattaforma adibita al trattamento e alla trasformazione del greggio. Questa zona dell'impianto risulta essere la più critica da un punto di vista di eventuali incidenti di rilascio, in quanto ospita tutte le apparecchiature e gli stoccaggi necessari per operare il processo di conversione del greggio in gas. Essa ospita inoltre il complesso di sale di controllo dalle quali viene monitorato l'intero processo.
- **Main Deck:** Questo è il deck che per ragioni di sicurezza si trova più in alto, in quanto è la zona che ospita il Living Quarter (LV) ovvero gli edifici adibiti ad ospitare il personale di bordo. Esso inoltre ospita tutta l'apparecchiatura di produzione di energia (turbine, generatori Diesel ecc...) che funge da supporto al LV e a tutta la piattaforma.

Si noti come non sia stato menzionato l'Elydeck, ovvero l'area adibita all'atterraggio e decollo dell'elicottero per il trasporto del personale. In sede di progettazione si è deciso di non rappresentare questa zona per motivi di semplicità realizzativa e perché tale zona non è interessata da alcun tipo di rilascio, dunque non sarebbe stata di fondamentale importanza per i nostri scopi. Di seguito una tabella riepilogativa delle dimensioni scelte per il modello reale e di conseguenza per il mock-up scalato.

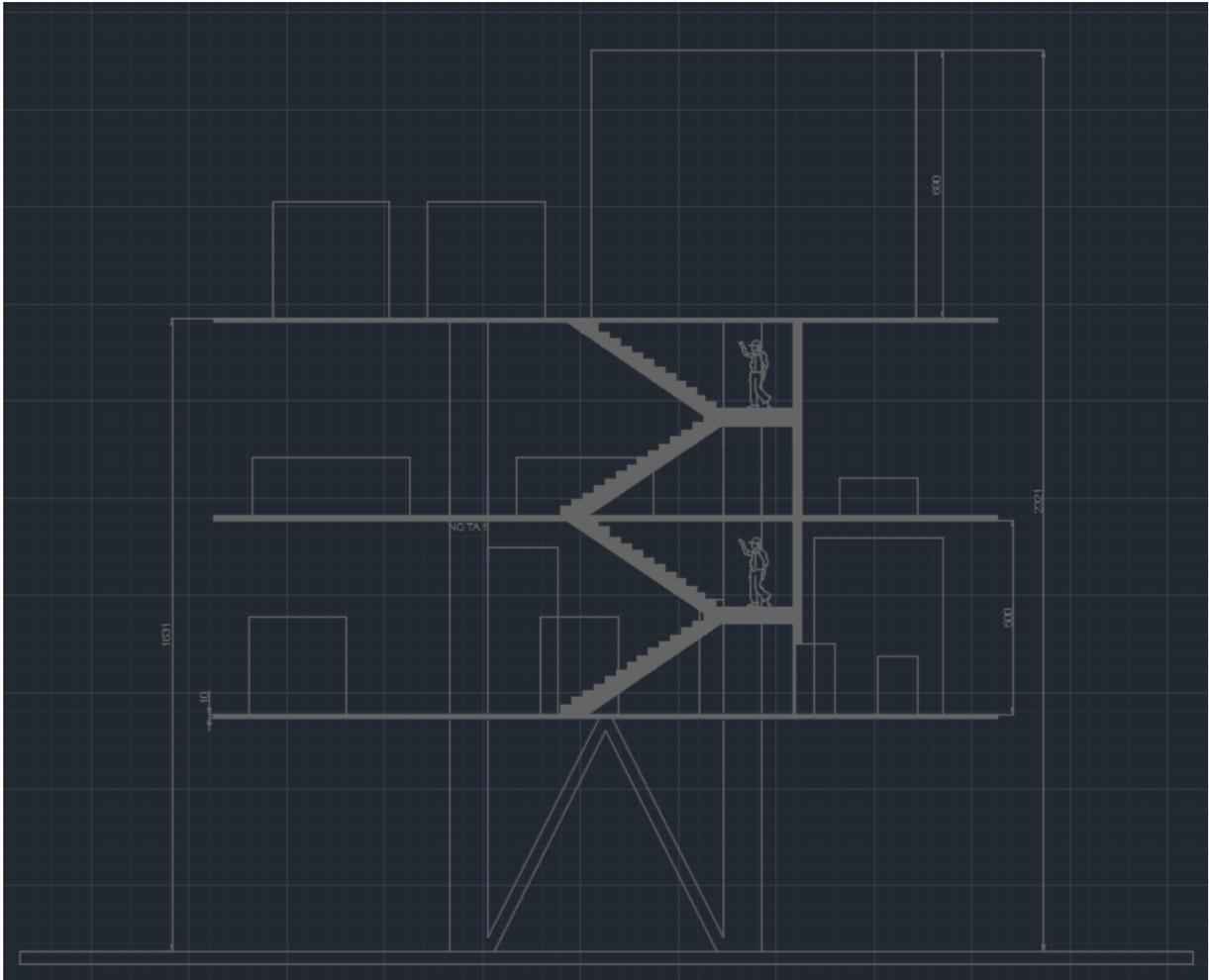
MODELLO REALE E MOCK-UP IN SCALA 1:10		
<b>Larghezza</b>	30 [m]	3 [m]
<b>Lunghezza</b>	20 [m]	2 [m]
<b>Spessore Deck</b>	0,1 [m]	0,01 [m]
<b>Distanza inter-deck</b>	5 [m]	0,5 [m]
<b>Larghezza/Lunghezza piloni</b>	1 [m]	0,1 [m]
<b>Altezza escluso LV</b>	16 [m]	1,6 [m]
<b>Altezza totale</b>	23 [m]	2,3 [m]

*Tabella 11: Riepilogo dimensioni Mock-up*

Da notare che per quanto riguarda le distanze interdeck che nella Tabella 11 sono indicate con 0,5 [m] esse sono in realtà da intendersi variabili in un range 0,5 [m]-0,7 [m] per mezzo di piloni regolabili. Il motivo di tale scelta è dovuto alla presenza degli ostacoli. In ogni deck saranno infatti presenti degli ingombri che rappresentano i vari componenti, macchinari e possibili stoccaggi presenti su una piattaforma reale. Anche se nelle piante dei deck che verranno mostrate in seguito tali oggetti risultano fissi, l'idea alla base delle prove è quella di avere una disposizione di tali ingombri che sia il più variabile possibile, ecco che allora in sede di laboratorio dovrà essere possibile spostare tali blocchi creando geometrie di ingombro diverse. Dunque, proprio per rendere semplice il movimento di tali blocchi l'altezza interdeck sarà variabile per permettere all'operatore di modificare manualmente la loro posizione ed ottenere nuove configurazioni.

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Di seguito una immagine che mostra la modellazione del prospetto della piattaforma:



*Figura 35: Prospetto Mock-up*

### 3.1.3 Gli ingombri

Per quanto riguarda gli oggetti inseriti nelle piante, ed in particolare per quanto riguarda le loro dimensioni e la loro disposizione iniziale, ci si è riferiti alla tipica disposizione ed alle tipiche dimensioni di ingombri che normalmente si possono trovare in una piattaforma di estrazione di gas come quella presa in analisi. Dunque tra tutte le apparecchiature, componenti e moduli presenti in un impianto reale ci si è in particolare focalizzati su:

- Oggetti ritenuti interessanti dal punto di vista di un eventuale rilascio accidentale di gas in quanto possibili sorgenti di tale fenomeno come separatori, serbatoi di stoccaggio di sostanze pericolose. Per la giustificazione della scelta di tali oggetti si rimanda al paragrafo 3.3.4
- Oggetti non ritenuti interessanti dal punto di vista del rilascio di sostanze pericolose ma che risultano essere molto ingombranti come grossi serbatoi di stoccaggio dell'acqua, o di azoto, turbine ecc...
- Oggetti ritenuti d'interesse per la sicurezza del personale che staziona in piattaforma come il modulo alloggi e le sale di controllo. Entrambi sono luoghi in cui si trova un certo affollamento di persone e quindi per i nostri scopi, risulta essere d'interesse capire come si evolverebbe una eventuale nube di materiale tossico attorno questi

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

edifici; inoltre dal punto di vista dell'ingombro rappresentano strutture di dimensioni non trascurabili.

### 3.1.4 Piante e prospetti Mock up

Le piante ed i prospetti del mock-up sono stati realizzati con il software commerciale AutoCAD 2016 e sono consultabili in formato A3 e in scala di stampa 1:10 in Allegato 1.

In particolare:

- Allegato 1.1: Sezione AA'
- Allegato 1.2: Sezione BB'
- Allegato 1.3: Sezione 1
- Allegato 1.4: Cellar Deck
- Allegato 1.5: Production Deck
- Allegato 1.6: Main Deck

## 3.2 Analisi gas per la simulazione

A questo punto del percorso definita l'area di prova, e definito il mock up, il passo successivo è stato quello di trovare un gas opportuno da utilizzare per le prove sperimentali di rilascio.

Innanzitutto sarà approfondito meglio il classico processo di estrazione di gas naturale che viene effettuato su un sistema petrolifero offshore per capire che tipo di rilascio vogliamo simulare.

Una volta individuato il fenomeno reale che si vuole andare a riprodurre in laboratorio ci si potrà invece concentrare sulla ricerca di un gas che risulti ottimale per i nostri scopi. In particolare dovrà essere un tipo di gas che non sia pericoloso per la salute di chi opera all'interno del laboratorio ma al tempo stesso che simuli bene il fenomeno reale.

Scelto tale gas ed individuate tutte le condizioni al contorno di un rilascio incidentale in piattaforma si procederà con le simulazioni per validare o eventualmente rifiutare tale scelta.

### 3.2.1 Caratteristiche dei gas per utilizzo in laboratorio

Nel paragrafo 1.1.5 si è detto che i fenomeni che si vogliono approfondire e studiare saranno in particolare due:

- Rilascio incidentale di metano da apparecchiature in pressione
- Rilascio continuo di gas esausti

Si deve dunque in prima battuta trovare due gas che possano permettere la simulazione dei due sopracitati eventi, mantenendo una situazione di sicurezza in laboratorio.

L'opzione più ovvia sarebbe quella di utilizzare direttamente i gas coinvolti nel rilascio reale ma trovandoci in un ambiente chiuso come un laboratorio questo non può avvenire per ovvie ragioni di sicurezza.

La scelta del gas tracciante da impiegare per le simulazioni in laboratorio non può infatti essere arbitraria e non può esulare dai basilari criteri di sicurezza. Esistono in letteratura vari esperimenti in laboratorio che fanno largo utilizzo di gas traccianti per simulazioni di vario tipo. In particolare i metodi di rilascio e misurazione di gas traccianti in ambienti di prova chiusi è molto utilizzata in medicina, negli esperimenti di ventilazione degli edifici e per i test dei sistemi di condizionamento.

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Basandosi sui risultati di tali studi di seguito sono indicati i principali criteri che dovrebbe avere un gas tracciante che viene utilizzato in ambienti di prova chiusi come quello analizzato nel nostro caso: [30]

- Poco costoso
- Facilmente misurabile
- Non tossico e non allergenico
- Non infiammabile
- Avere approssimativamente lo stesso peso molecolare del gas da simulare
- Non essere assorbito da alcuna superficie all'interno dello spazio di prova
- Non essere uno dei normali costituenti dell'aria nell'ambiente di prova

Ovviamente non esiste alcun gas tracciante che soddisfi tutti i requisiti sopra citati, quindi dipende dal caso considerato un tipo di gas potrebbe essere migliore di un altro in base agli obiettivi che si vogliono raggiungere. Per esempio nei sopra menzionati esperimenti di infiltrazione dell'aria sono molto utilizzati gas inerti o l'SF<sub>6</sub>, in quanto molto facili da rintracciare e misurare in ambiente chiuso in cui è presente aria. In particolare l'SF<sub>6</sub> è misurabile fino ad un dettaglio di parti per miliardi.

Di seguito una tabella che riassume le caratteristiche dei principali gas che sono utilizzati come traccianti per gli esperimenti di rilasci di aria, volti a studiare eventuali infiltrazioni di quest'ultima in particolari ambienti:

The table shows different tracer gas candidates and their suitability according to different aspects. H\* stands for forming gas, which is a mixture of 95% nitrogen and 5% hydrogen giving the properties of hydrogen gas without being explosive. (+ +: excellent, +: good, o: fair, -: poor, - -: very poor).

Evaluation criteria	Ar	CO <sub>2</sub>	He	H*	SF <sub>6</sub>	Ne
Natural conc.	--	--	+	++	++	++
Pollution	++	o	++	+	--	++
Therm. stability	++	++	++	--	--	++
Price of gas	+	++	-	++	-	--

Tabella 12: Caratteristiche di alcuni gas traccianti usati in laboratorio [31]

Fatte le dovute premesse ed analizzando la Tabella 12 si è subito escluso un utilizzo dell'SF<sub>6</sub> in quanto è un gas molto pesante con una densità di 6,17 Kg/m<sup>3</sup> il che non lo renderebbe adatto ne per le simulazioni di rilascio del metano ne per una simulazione di rilascio dei gas esausti. Questi ultimi infatti sono caratterizzati da un'elevata temperatura e dunque avranno delle densità molto basse. Ci si concentrerà dunque maggiormente sui gas nobili presenti nella tabella.

### 3.2.2 Gas puri proposti per la simulazione del rilascio di metano

Focalizziamoci in prima battuta sul rilascio di metano in quanto rappresenta il fenomeno più importante dal punto di vista della sicurezza su una piattaforma ed inoltre rappresenta il fenomeno principale che si vuole andare a simulare con le prove sperimentali.

Assimilando il metano ad un gas ideale per il quale vale dunque l'equazione di stato dei gas perfetti:

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

$$pv = R^*T \quad (7)$$

Dove

- p è la pressione in [Pa]
- v è il volume specifico del gas espresso in [m<sup>3</sup>/Kg]
- T è la temperatura del gas espressa in [K]
- R\* è la costante caratteristica del gas espressa in [J/KgK]

Otteniamo la densità:

$$\rho = \frac{p}{R^*T} \quad (8)$$

Essa per il CH<sub>4</sub> in condizioni normali ovvero T=0 [°C] e p=1 [Bar] è pari a:

$$\rho_{CH_4} = 0,645 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]$$

I gas che in prima battuta sono stati presi in considerazione per la simulazione di un rilascio di metano sono stati in particolare:

- Anidride Carbonica
- Argon
- Neon

Una prima scelta iniziale è ricaduta sui i gas appena elencati in quanto soddisfacevano una buona parte dei requisiti precedentemente illustrati.

In particolare per quanto riguarda i criteri di sicurezza del laboratorio il Neon e l'Argon che sono dei gas nobili presentano le seguenti caratteristiche:

- Inerti
- Non tossici e non infiammabili
- Non nocivi per l'ambiente
- Caratterizzati come asfissianti solamente in grosse quantità

Mentre l'Anidride Carbonica:

- Non infiammabile
- Non nocivo per l'ambiente
- In alta concentrazione causa rapidamente insufficienza respiratoria anche quando il livello di ossigeno è mantenuto normale (20-21%)

Scelti i gas si è andati avanti con l'analisi valutando, analogamente a quanto fatto per il metano, la densità in condizioni normali ottenendo i seguenti valori:

$$\rho_{Ne} = 0,806 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]$$

$$\rho_{Ar} = 1,613 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]$$

$$\rho_{CO_2} = 1,775 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]$$

Fin da subito è chiaro come il Neon potrebbe sicuramente essere il più indicato per riprodurre il comportamento del metano durante un rilascio, in quanto le due densità sono molto simili.

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Inoltre anche la densità del Neon risulta essere minore di quella dell'aria ( $\rho=1,29$  [Kg/m<sup>3</sup>] in condizioni normali) questo dunque lo caratterizzerebbe come gas leggero analogamente al CH<sub>4</sub>. Discorso diverso per Argon e Anidride Carbonica, la loro densità risulta infatti essere molto più alta di quella del CH<sub>4</sub> e più alta di quella dell'aria, questo dunque li classificherebbe come gas pesanti.

### 3.2.3 Miscela di gas proposta per la simulazione del rilascio di metano

Oltre ai gas puri proposti, in sede di progettazione si è anche pensato a delle miscele di gas in cui uno dei componenti fosse il metano. L'unico ostacolo da superare è la pericolosità del metano, esso è infatti un gas altamente infiammabile. Si è dunque cercata una miscela che avesse una concentrazione di metano al di sotto del suo LFL (Low Flamability Level). L'LFL non è altro che il limite inferiore di infiammabilità di un gas, e rappresenta il limite oltre il quale una miscela di gas e aria può essere innescata. Ovviamente esiste anche un analogo limite superiore noto come UFL (Upper Flamability Level) e rappresenta il limite oltre il quale una miscela gas-aria è così ricca di gas da non essere più innescabile. Di conseguenza una miscela risulta incendiabile se la concentrazione di gas è compresa tra i due limiti inferiore e superiore. Per il metano tali limiti sono i seguenti:

$$5\% = LFL_{CH_4} \leq \%Vol_{CH_4} \leq UFL_{CH_4} = 15\%$$

I valori per entrambi i limiti sono stati arrotondati. Talvolta in letteratura si possono trovare dei valori diversi.

Appurato dunque la necessità di trovare una miscela la cui percentuale volumetrica di Metano fosse al di sotto del 5% ci si è rivolti a vari distributori di gas, e si è trovata una miscela di aria-metano in percentuali volumetriche 97,5%-2,5%, quindi abbastanza sotto il valore di LFL di quest'ultimo. Questo ci assicura che un rilascio di tale miscela in laboratorio non comporta il rischio di eventuali inneschi. Dovrà però essere assicurata un'adeguata ventilazione del locale al termine di ogni sessione di prove e il locale dovrà essere munito di eventuali rilevatori di gas per assicurarsi che non si formino delle sacche di gas nella parte alta dell'edificio, essendo appunto il metano un gas leggero.

La miscela è stata trattata come una miscela di gas ideali per cui le proprietà finali di tale miscela non sono altro che la media pesata delle proprietà dei singoli componenti. Di seguito una breve giustificazione di quanto asserito:

Innanzitutto premettiamo una serie di definizioni e relazioni utili: indichiamo dunque con  $N$  il numero di componenti della miscela. Adesso, sia  $n_i$  il numero di moli dell' $i$ -esimo componente ed  $n$  quello totale, per definizione si avrà che:

$$n = \sum_{i=1}^N n_i$$

Sia invece  $M_i$  la massa dell' $i$ -esimo componente, allora quella del miscuglio risulta essere la seguente

$$M_{tot} = \sum_{i=1}^N M_i$$

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci  
accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Siano inoltre  $T$  e  $V$  la temperatura ed il volume della miscela di gas ideali; si definisce pressione parziale del gas  $i$ -esimo, la pressione che eserciterebbero le  $n_i$  moli di quel componente se esse occupassero da sole tutto il volume della miscela alla temperatura  $T$ .

Fondamentale a questo punto citare la Legge di Dalton delle pressioni che in una miscela di gas ideali, fornisce la relazione che lega le pressioni parziali dei singoli componenti con la pressione dell'intera miscela. Essa afferma "La pressione totale di una miscela di gas è la somma delle pressioni parziali dei singoli costituenti", in formule

$$P_{tot} = \sum_{i=1}^N P_i$$

Dove per l'appunto:

- $P_{tot}$  è la pressione totale del sistema
- $P_i$  è la pressione parziale del componente  $i$ -esimo

Questa legge è molto importante perché per le miscele di gas ideali permette di lavorare sfruttando il principio di sovrapposizione degli effetti, in particolare per le pressioni parziali. Da quest'ultima risulta inoltre che ogni costituente  $i$ -esimo della miscela si comporta come se si trovasse da solo nel volume  $V$ , in condizioni di temperatura  $T$  e pressione  $P_i$ . Consideriamo per comodità due sole componenti e per ciascun componente scriviamo l'equazione di stato dei gas perfetti nella seguente forma

$$P_1 V = M_1 R_1^* T$$

$$P_2 V = M_2 R_2^* T$$

Sommando le due precedenti equazioni membro a membro si ottiene:

$$(P_1 + P_2)V = (M_1 R_1^* + M_2 R_2^*)T$$

Che in forma compatta diventa

$$P_{tot} V = M_{tot} R_{tot}^* T$$

Dove  $R_{tot}^*$  è la costante caratteristica della miscela dei gas in [J/KgK]

$$R_{tot}^* = \frac{M_1 R_1^* + M_2 R_2^*}{M_1 + M_2}$$

Che si può riscrivere come

$$R_{tot}^* = \frac{M_1}{M_{tot}} R_1^* + \frac{M_2}{M_{tot}} R_2^*$$

Dove  $\frac{M_i}{M_{tot}}$  è la percentuale massica del componente  $i$ -esimo nella miscela che indicheremo di seguito con  $g_i$ .

Si procede in modo analogo per tutte le altre proprietà del gas:

$$c_{p,tot} = c_{p,1} g_1 + c_{p,2} g_2$$

$$c_{v,tot} = c_{v,1} g_1 + c_{v,2} g_2$$

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci  
accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Avendo delle percentuali volumetriche, il primo passo necessario per il calcolo delle proprietà della miscela sarà dunque ottenere le corrispondenti percentuali massiche dei due componenti aria e metano. Da notare che anche l'aria risulta essere una miscela ed in particolare in questo caso è stata trattata come una miscela dei soli due componenti principali, ovvero azoto ed ossigeno, rispettivamente con percentuali volumetriche del 79% e del 21%.

Per passare dalle percentuali volumetriche alle percentuali massiche si è ipotizzato innanzitutto di avere 1000 Kmol di miscela. Di seguito si mostrerà la procedura per il calcolo di tali percentuali per l'aria, ovviamente ottenute tutte le grandezze per l'aria il procedimento sarà analogo per la nostra miscela.

$$1000 \text{ Kmol}_{aria} = 210 \text{ Kmol}_{O_2} + 790 \text{ Kmol}_{N_2} = 210 \text{ l}_{O_2} + 790 \text{ l}_{N_2}$$

$$1000 \text{ Kmol}_{aria} \text{ contengono} = 210 \cdot 32 \text{ Kg}_{O_2} + 790 \cdot 28 \text{ Kg}_{N_2} = 28840 \text{ Kg}_{aria} = M_{tot}$$

Le frazioni massiche dei due componenti sono dunque

$$g_{O_2} = \frac{210 \cdot 32}{28840} = 23,3\%$$

$$g_{N_2} = \frac{790 \cdot 28}{28840} = 76,7\%$$

Ottenute tali frazioni, sono state calcolate le proprietà dell'aria e a partire da quelle le frazioni massiche della miscela aria-metano che, omettendo i calcoli, risultano essere pari a

$$g_{aria} = 98,9\%$$

$$g_{CH_4} = 1,1\%$$

Una volta calcolate queste ultime, sono state calcolate le proprietà della miscela, e a partire da queste, sfruttando nuovamente l'equazione di stato dei gas ideali (8) in condizioni normali si è ricavata la densità

$$\rho_{miscela} = 1,163 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]$$

Salta subito all'occhio come essa sia diversa da quella del metano calcolata nelle stesse condizioni, quindi apparentemente il Neon risulta sempre il migliore. Ma sfruttando la miscela si otterrebbero dei vantaggi non indifferenti. Innanzitutto tale densità, seppur di poco, risulta essere inferiore a quella dell'aria in condizioni normali, dunque il comportamento della miscela sarebbe comunque quello di un gas leggero. In secondo luogo la miscela si comporterà come tale fino allo sbocco del sistema di distribuzione gas, ma una volta in ambiente, quindi ad espansione finita, essendo il metano più leggero dell'aria, quest'ultimo si separerà e si comporterà in quanto tale. Dunque in un ottica di tracciabilità del gas ed ottimizzazione della posizione dei sensori di rilevamento del gas che poi non è altro che uno degli obiettivi finali degli esperimenti, l'utilizzo della miscela offre un grande vantaggio in quanto ci permette di utilizzare lo stesso gas che si vorrebbe tracciare nella realtà in piattaforma, ma a concentrazioni tali da non risultare pericoloso per la salute. Inoltre da un punto di vista di sensoristica, il metano sarà sicuramente più semplice da tracciare rispetto ad un gas come il Neon.

Di seguito dunque una tabella che mostra in maniera qualitativa tutti i vantaggi e gli svantaggi dei gas proposti fino a questo momento rispetto al metano puro.

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

<b>Gas</b>	<b>Densità</b>	<b>Pericolosità</b>	<b>Tracciabilità</b>
<b>Neon</b>	<i>Very good</i>	<i>Very good</i>	<i>Bad</i>
<b>Argon</b>	<i>Bad</i>	<i>Very good</i>	<i>Bad</i>
<b>Anidride Carbonica</b>	<i>Bad</i>	<i>Good</i>	<i>Good</i>
<b>Miscela Metano-Aria</b>	<i>Good</i>	<i>Very good</i>	<i>Very good</i>

Tabella 13: Riepilogo gas

### 3.2.4 Gas proposto per la simulazione del rilascio dei gas esausti

Per quanto riguarda la scelta di un possibile gas in grado di simulare il rilascio continuo di gas esausti, si sono innanzitutto analizzate le possibili apparecchiature che rilasciano in ambiente tali gas.

Prendendo in particolare in considerazione i dati di una piattaforma realmente funzionante si sono considerate le seguenti apparecchiature:

- Motori a gas
- Generatore Diesel
- Pompe
- Turbine

Per ognuna delle seguenti apparecchiature che producono dunque fumi esausti, si sono considerati questi ultimi composti principalmente dai seguenti inquinanti:

- NO
- CO
- CO<sub>2</sub>
- N<sub>2</sub>

Conoscendo in particolare la concentrazione all'uscita per ogni componente dei fumi si è calcolato il peso molecolare di quest'ultimi come media pesata

$$PM_{fumi} = \sum_{i=1}^N PM_i \cdot \%_{vol}$$

Una volta noto il peso molecolare dei fumi per ogni tipo di apparecchiatura ed essendo note le condizioni di rilascio per quanto riguarda la temperatura e la pressione dei fumi, mediante l'equazione dei gas perfetti (8) si è potuta calcolare la densità di ogni rilascio. Nella tabella seguente sono riportati tutti i valori utilizzati come input e il valore di densità calcolato per ogni rilascio:

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

	Inquinante	PM (g/mol)	PM_fumi (g/mol)	Concentrazione di inquinanti [%]	Temperatura dei fumi [°K]	Densità fumi (Kg/m <sup>3</sup> )
<b>Motori a gas</b>	NO	30	31,19	2,92E-04	861	0,441
	CO	28		2,00E-04		
	CO2	44		2,00E-01		
	N2	28		8,00E-01		
<b>Generatori Diesel</b>	NO	30	31,19	2,92E-04	788	0,482
	CO	28		2,00E-04		
	CO2	44		2,00E-01		
	N2	28		8,00E-01		
<b>Pompe</b>	NO	30	31,19	6,47E-04	727,7	0,522
	CO	28		3,49E-04		
	CO2	44		1,99E-01		
	N2	28		8,00E-01		
<b>Turbine</b>	NO	30	26,99	1,00E-04	809	0,407
	CO	28		6,00E-05		
	CO2	44		8,63E-02		
	N2	28		7,28E-01		
	H2O	18		1,56E-01		

Tabella 14: Densità gas esausti

Ottenute a questo punto le densità per ogni singola fonte di rilascio, si è banalmente effettuata una media aritmetica delle densità delle quattro fonti analizzate e si è ottenuto il seguente valore indicativo:

$$\rho_{esausti} = 0,463 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]$$

Essendo molto caldi questi fumi si comportano come un gas molto leggero, quindi a fronte di quanto già detto nel paragrafo **Error! Reference source not found.** la scelta più opportuna per simulare il loro comportamento è stata scegliere l'Elío. Esso infatti ha una densità di 0,1784 [Kg/m<sup>3</sup>] in condizioni normali, ed inoltre presenta delle ottime caratteristiche che lo rendono adatto ad un rilascio in condizioni controllate in laboratorio. Tra le principali:

- E' un gas inerte
- Non tossico e non infiammabile
- Non nocivo per l'ambiente
- Poco costoso

A questo punto sono stati individuati tutti i possibili gas per riprodurre i fenomeni di rilascio sopracitati. Nonostante sarebbe molto interessante procedere anche con l'analisi del rilascio continuo dei gas esausti, per poi effettuare dei futuri esperimenti di dispersione, in questa sede si è deciso di focalizzarsi esclusivamente sul rilascio di Metano. Questo per vari motivi, innanzitutto il modello CFD ibrido, che si vuole andare a confermare sperimentalmente tratta solamente dei rilasci accidentali in pressione e non rilasci continui, mentre da un punto di vista di ottimizzazione dei sensori anti-gas in piattaforma si è ritenuto più importante

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

concentrarsi sulla sola dispersione di metano causata dal rilascio accidentale, inoltre esulando dai principali obiettivi dell'attività di ricerca prevista si è ritenuto non fondamentale in questo momento far lievitare il budget dell'intero progetto aggiungendo un'ulteriore serie di esperimenti. Si è comunque ritenuto importante individuare in questa sede un possibile gas in grado di simulare il fenomeno del rilascio continuo degli esausti, in modo da avere per un eventuale futuro studio una base di partenza da cui iniziare.

### 3.3 Studio sui rilasci di gas in pressione

Concentriamoci a questo punto sul solo rilascio accidentale in pressione. Un rilascio accidentale di una sostanza avviene di solito a causa di cedimenti locali o totali della struttura (serbatoio, tubazioni, giunzioni...). Una volta creatosi il foro, il rilascio avviene a causa di una diversa pressione tra l'interno del serbatoio e l'ambiente esterno. Questo  $\Delta P$  è dovuto a:

- Compressione del gas all'interno del serbatoio
- Tensione del vapore saturo
- Pressione idrostatica
- Ecc...

Il modello di rilascio utilizzato per studiare l'evoluzione del fenomeno preso in esame cambia fortemente in base alla causa della differenza di pressione ovvero in base allo stato fisico in cui è stoccata la sostanza come mostrato dalla seguente tabella riassuntiva

	Nel serbatoio/tubazione	Condizioni ambiente
Stato fisico sostanza	Gas → Rilascio di gas compresso	Gas
	Liquido → Rilascio di gas liquefatto { per pressione (pressurizzato) { per temperatura (criogenico)	Gas
	Liquido → Rilascio di liquido	Liquido

Tabella 15: Modelli di rilascio

Assunto che su una piattaforma, vista la grandissima quantità di sostanze pericolose presenti sia sotto forma di gas che sotto forma di liquidi, i rilasci accidentali potrebbero essere di tutti e tre i tipi in base all'apparecchiatura che subisce il danno. In tale elaborato ci si concentrerà solamente sui rilasci di gas compresso.

Nel seguente paragrafo saranno dunque definiti ed approfonditi i rilasci di gas da fori/ugelli in serbatoi o tubazioni, inoltre verrà approfondita anche la dinamica degli efflussi da ugelli convergenti e convergenti-divergenti. Tali approfondimenti sono risultati fondamentali per simulare la dinamica di efflusso di un rilascio incidentale in piattaforma, necessaria per validare o meno i gas precedentemente proposti per le simulazioni, ed una volta individuato il gas più opportuno è stato necessario simularne il suo rilascio in laboratorio per sviluppare il sistema di distribuzione di quest'ultimo.

#### 3.3.1 Fluidodinamica degli efflussi dagli ugelli convergenti e convergenti-divergenti

Tale modello viene considerato valido da applicare definendo come gas una sostanza allo stato aeriforme, dunque è applicabile sia ai gas veri e propri sia ai vapori surriscaldati.

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Si parte dall'equazione di stato dei gas ideali

$$\rho = \frac{p}{R^*T} \quad (8)$$

Che come già anticipato nel nostro caso rappresenta il modello usato per caratterizzare la sostanza. Esistono altri modelli più precisi come l'equazione di Van Der Waals, o la cosiddetta Legge degli stati corrispondenti, ma per ragioni di semplicità si è scelto di utilizzare il primo modello che comunque rappresenta una buona approssimazione soprattutto nel caso di gas a basse pressioni ed alte temperature.

Scelto dunque il modello di rappresentazione del gas, si può dunque procedere allo studio del modello termodinamico di efflusso di un gas attraverso un foro/ugello.

Generalmente oltre alla già introdotta ipotesi di gas ideale, per studiare questo tipo di fenomeni si adottano anche le seguenti che ne semplificano di molto la trattazione:

1. Moto stazionario del fluido
2. Espansione adiabatica ed isoentropica
3. Moto unidirezionale

La prima ipotesi permette di semplificare notevolmente la trattazione e risulta perfettamente valida nel caso di rilasci accidentali da reti di tubazioni, come i metanodotti, questo perché essendo quest'ultimi assimilabili a serbatoi di capacità infinita questo ci permette di asserire che durante il rilascio la pressione interna rimane costante. Inoltre visti gli obiettivi degli esperimenti, ovvero verificare la robustezza dei modelli CFD e trovare la posizione ottimale dei sensori di rilevamento gas in piattaforma, si assume che quest'ultimi siano altamente performanti e che quindi riescano ad intervenire in un breve periodo di tempo, rispetto a quello che servirebbe per far sì che un serbatoio riversi tutto il suo contenuto; ed in tale periodo di tempo vista l'enorme massa contenuta in tali serbatoi, la variazione di pressione è talmente contenuta che ha senso considerarla quasi costante.

La seconda ipotesi è una descrizione abbastanza realistica del fenomeno di espansione all'interno di un ugello/foro soprattutto se quest'ultima avviene in tempi molto brevi e con limitate perdite di carico dovute agli attriti.

La terza ipotesi è sicuramente veritiera nel fenomeno di rilascio in ambiente da una tubazione o serbatoio.

A questo punto si consideri un volume di controllo che sia limitato tra le sezioni di ingresso e di uscita di un ugello, si faccia riferimento alla Figura 36:

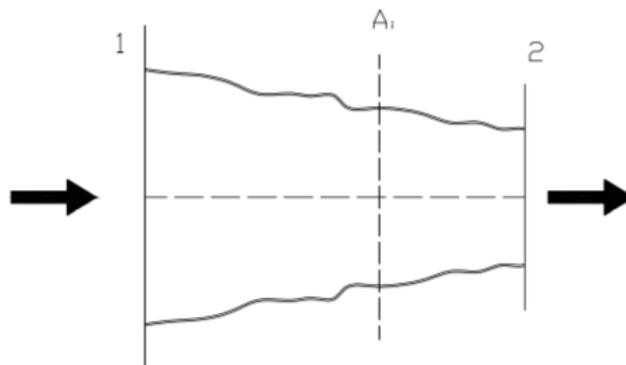


Figura 36: Sezione di un generico ugello

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci  
accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Tra le due sezioni considerate, si può applicare il primo principio della termodinamica:

$$dQ + dL = dh + dE_c + dE_p \quad (9)$$

Dove

- $dQ$  è la variazione di calore
- $dL$  è la variazione di lavoro meccanico
- $dh$  è la variazione di energia interna
- $dE_c$  è la variazione di energia cinetica
- $dE_p$  è la variazione di energia potenziale

Di tutti questi termini risultano essere nulli:  $dQ$  per l'ipotesi di adiabaticità del processo,  $dL$  in quanto essendo l'ugello fermo non si ha variazione di lavoro meccanico e  $dE_p$  in quanto si trascura la variazione di quota tra la sezione d'ingresso e di uscita dell'ugello.

Risultano invece diversi da zero i due termini al secondo membro dell'equazione, ovvero la variazione di entalpia  $dh$  e la variazione di energia cinetica  $dE_c$ . Queste due grandezze sono definite come segue:

$$dE_c = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2}$$

$$dh = c_p(T_2 - T_1)$$

Dove  $w_1$ ,  $w_2$  e  $T_1$ ,  $T_2$  sono rispettivamente le velocità e le temperature del gas nelle sezioni di ingresso e di uscita dell'ugello, mentre  $c_p$  è il calore specifico a pressione costante del gas.

Sostituendo queste due definizioni nell'equazione di conservazione dell'energia (9) e sfruttando l'ipotesi di espansione adiabatica, si ottiene la seguente

$$\frac{w_2^2}{2} = -c_p(T_2 - T_1) = c_p T_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]$$

Dove  $\gamma$  è definito come segue:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

Mentre  $w_1$  risulta essere nulla in quanto si considera fermo il gas nella sezione 1. Ricordando l'equazione di stato dei gas perfetti (8) e considerando la definizione della costante specifica dei gas  $R^* = c_p - c_v$ , l'espressione della velocità di efflusso diventa la seguente:

$$w_2 = \sqrt{2 \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} \quad (10)$$

L'equazione (10) non è altro che l'espressione della velocità di efflusso del gas in funzione delle proprietà di quest'ultimo e delle sue condizioni all'ingresso e all'uscita dell'ugello. Tale equazione è valida solamente nel caso in cui il flusso di gas sia sub critico, ovvero nel caso in cui la sua velocità sia minore della velocità del suono. Di seguito la giustificazione.

Si consideri la seguente espressione della variazione del lavoro meccanico

$$dL = \frac{dp}{\rho} + dL_w + dE_c + dE_p$$

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci  
accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Dove il termine  $\frac{dp}{\rho}$  è la variazione di lavoro dovuta alla variazione di pressione tra le sezioni 1 e 2 e  $dL_w$  è la quota di lavoro persa a causa degli attriti. Analogamente a prima risultano nulli i termini  $dL$  e  $dE_p$  ed inoltre considerando liscio l'ugello si può supporre nullo anche il termine  $dL_w$ . Per cui si ottiene la seguente espressione:

$$dE_c = d\left(\frac{w^2}{2}\right) = -\frac{dp}{\rho}$$

$$wdw = -\frac{dp}{\rho} \quad (11)$$

Dall'equazione (11) si intuisce che:

- se  $dp < 0 \rightarrow dw > 0$
- se  $dp > 0 \rightarrow dw < 0$

In pratica, se il gas subisce un'espansione allora la sua velocità e dunque la sua energia cinetica aumentano, viceversa se il gas subisce una compressione allora la sua velocità e di conseguenza la sua energia cinetica diminuiscono.

Riprendendo l'ipotesi di moto stazionario, si ricava che tra le sezioni 1 e 2 la massa si conserva; per cui considerando una generica sezione  $A_i$  si ha che

$$\dot{m} = A_i w_i \rho_i \quad (12)$$

Differenziando

$$d\dot{m} = \frac{\partial \dot{m}}{\partial \rho} d\rho + \frac{\partial \dot{m}}{\partial A} dA + \frac{\partial \dot{m}}{\partial w} dw = A w d\rho + w \rho dA + A \rho dw = 0$$

Se si dividono entrambi i membri dell'equazione per la portata  $\dot{m}$  si ottiene

$$\frac{d\dot{m}}{\dot{m}} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dA}{A} + \frac{dw}{w} = 0 \quad (13)$$

Costruendo un sistema con le equazioni (11) e (13) e introducendo la definizione di velocità del suono:

$$w_s^2 = \left(\frac{dp}{d\rho}\right)_{isoentropica} \quad (14)$$

Dove la (14) è meglio nota come *prima equazione di Laplace*, si ottiene il seguente sistema

$$\begin{cases} \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dA}{A} + \frac{dw}{w} = 0 \\ \frac{dp}{\rho} + wdw = 0 \\ w_s^2 = \left(\frac{dp}{d\rho}\right)_{isoentropica} \end{cases}$$

E risolvendo si ottiene la seguente equazione

$$\frac{\rho}{A} \frac{dA}{dp} = \frac{1}{w^2} - \frac{1}{w_s^2} \quad (15)$$

L'equazione (15) è molto importante perché permette di ricavare le seguenti informazioni:

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci  
accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

<b>Espansione: <math>dp &lt; 0</math></b>	
Se $dA < 0 \rightarrow w^2 < w_s^2$	Ugello convergente $\rightarrow$ Flusso subcritico
Se $dA > 0 \rightarrow w^2 > w_s^2$	Ugello divergente $\rightarrow$ Flusso super-critico
<b>Compressione: <math>dp &gt; 0</math></b>	
Se $dA > 0 \rightarrow w^2 < w_s^2$	Ugello divergente $\rightarrow$ Flusso subcritico
Se $dA < 0 \rightarrow w^2 > w_s^2$	Ugello convergente $\rightarrow$ Flusso super-critico

Tabella 16: Tipi di ugello e flussi

Questo spiega chiaramente perché nel caso in cui si avesse un rilascio di un gas in atmosfera attraverso un ugello convergente o foro, il flusso sarebbe un flusso sonico, ovvero la velocità del gas sarebbe pari a quella del suono per quel gas in quelle condizioni. Ecco che dunque quest'ultima assume un ruolo chiave in quanto, nota questa si possono ricavare informazioni utili sui gradienti di pressione e sulle portate rilasciate.

Si vuole dunque, a questo punto, ricavare il rapporto critico tra le pressioni, ovvero il rapporto tra la pressione esterna e quella interna al serbatoio/tubazione che permette di discriminare se un efflusso è sonico o no. Si era in precedenza introdotta la prima equazione di Laplace:

$$w_s^2 = \left( \frac{dp}{d\rho} \right)_{isoentropica}$$

Dove il rapporto  $\frac{p}{\rho^\gamma}$  è costante in caso di trasformazione adiabatica ed isentropica. Differenziando in modo logaritmico si ottiene:

$$\ln(p) - \gamma \ln(\rho) = \ln(const) \rightarrow \frac{dp}{p} - \gamma \frac{d\rho}{\rho} = 0 \rightarrow \frac{dp}{d\rho} = \gamma \frac{p}{\rho}$$

Sostituendo questa espressione nella prima equazione di Laplace si ottiene la seguente espressione della velocità del suono per un gas

$$w_s = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}} = \sqrt{\gamma R^* T}$$

E' subito chiaro come la velocità del suono per un gas dipenda fortemente dal tipo di gas attraverso il parametro  $\gamma$  ed  $R^*$  e dalle condizioni di temperatura.

Con l'obiettivo di ottenere il rapporto critico tra le pressioni si consideri nell'equazione (10) della velocità di efflusso la pressione di sbocco  $p_2$  pari alla pressione critica  $p_{cr}$ .

$$w_2 = \sqrt{2 \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[ 1 - \left( \frac{p_{cr}}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]}$$

Ricordandosi dell'ipotesi di gas ideale si ricava il rapporto critico delle pressioni come segue:

$$\left( \frac{p_{cr}}{p_1} \right) = \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (16)$$

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci  
accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Dall'espressione (16) è chiaro come il rapporto critico delle pressioni sia una funzione del tipo di gas ed in particolare del parametro  $\gamma$ .

Per quanto riguarda la portata in massa da quanto visto in precedenza si avrà che

$$\dot{m} = A_1 w_1 \rho_1 = A_2 w_2 \rho_2 = A_2 \rho_2 \sqrt{2 \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} \quad (17)$$

Avendo supposto una trasformazione adiabatica è valida la seguente relazione:

$$\frac{p_i}{\rho_i^\gamma} = \text{cost} \rightarrow \rho_2 = \rho_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{\gamma}}$$

Sostituendo la precedente espressione nell'equazione (17) si ottiene tale risultato

$$\dot{m} = A_2 \sqrt{2 \frac{\gamma}{\gamma - 1} p_1 \rho_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \quad (18)$$

Si è ottenuta la portata di efflusso del gas in relazione al rapporto tra le pressioni esterna ed interna.

Dato dunque un ugello convergente come quello in figura

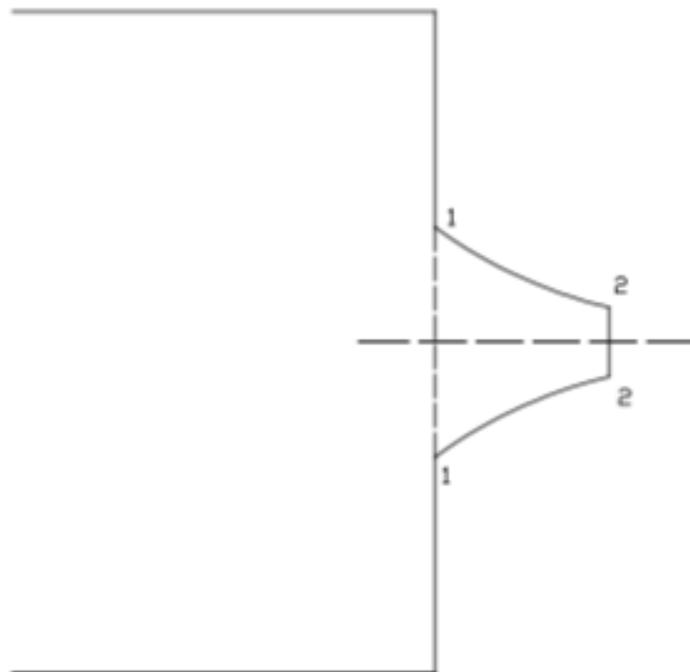


Figura 37: Ugello convergente

L'andamento della portata segue l'andamento mostrato nella figura seguente:

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci  
accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

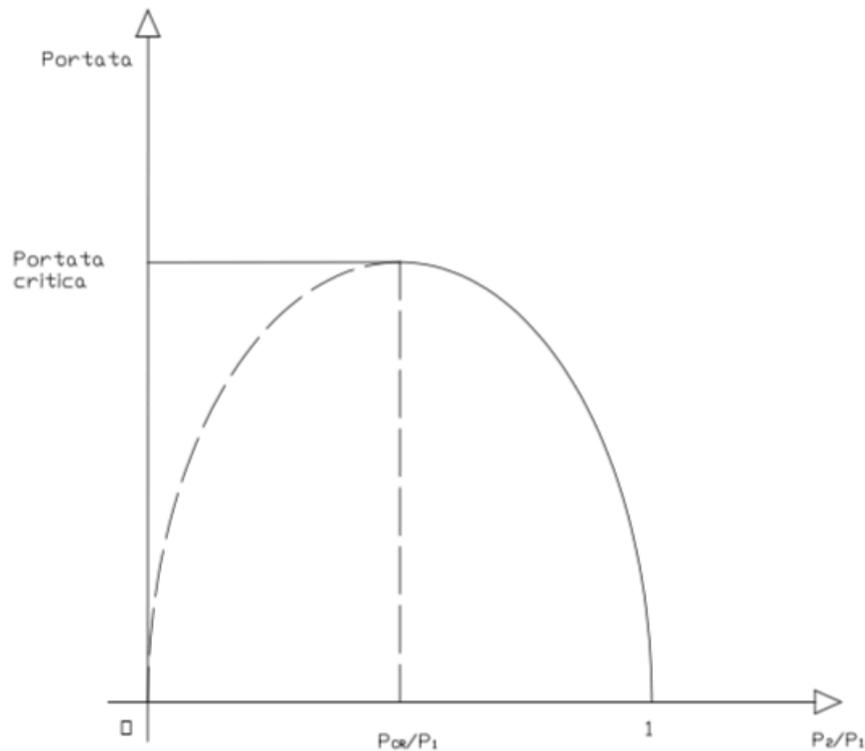


Figura 38: Andamento della portata in un ugello convergente

Quando il rapporto tra le pressioni diventa critico, ovvero quando la velocità di efflusso è pari a quella sonora, la portata si blocca. Da questo momento in poi anche se la pressione esterna diminuisce la portata rimarrà costante (portata critica). Il grafico risulta infatti diviso in due tratti ben distinti, il tratto che va dal punto 1 al punto al rapporto critico delle pressioni, in cui l'andamento è parabolico e descritto dall'equazione (18) ed il tratto costante pari alla portata di efflusso critica, che risulta essere anche la portata massima. Quest'ultima si ottiene sostituendo nell'equazione (18) l'espressione del rapporto critico delle pressioni (16) ottenendo dunque i due seguenti casi:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{se } \frac{p_2}{p_1} \leq \frac{p_{cr}}{p_1} \rightarrow \dot{m} = \dot{m}_{cr} = A_2 \sqrt{p_1 \rho_1} \sqrt{\gamma \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \\ \text{se } \frac{p_2}{p_1} > \frac{p_{cr}}{p_1} \rightarrow \dot{m} = A_2 \sqrt{2 \frac{\gamma}{\gamma-1} p_1 \rho_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \end{array} \right. \quad (19)$$

Dall'espressione della portata critica risulta chiaro che se si volesse agire sul suo valore si può agire solamente a monte dell'ugello variando pressione e densità del gas, quindi agendo su temperatura ed energia interna del gas. In questo modo si agirebbe dunque sul valore di portata critica ma va fatto notare che la velocità rimarrebbe comunque quella del suono.

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci  
accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

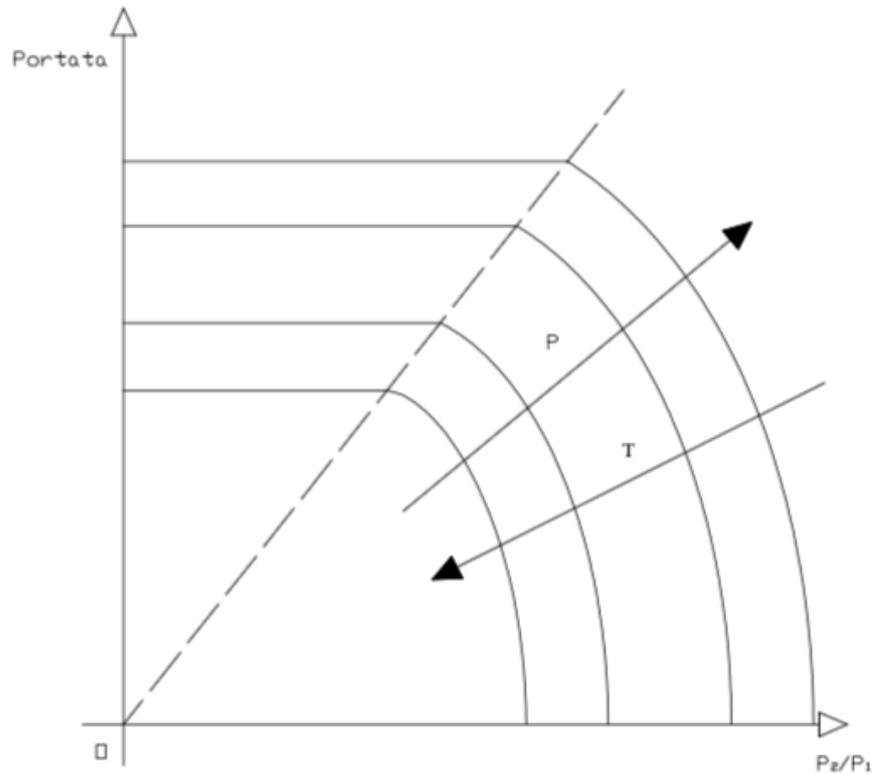


Figura 39: Andamento della portata al variare di pressione e temperatura del gas

Nel caso in cui, invece, si abbia a che fare con un ugello convergente-divergente come quello in Figura 40 allora la velocità di efflusso del gas può essere superiore a quella del suono. Discorso diverso per la portata che invece rimane comunque quella critica che si raggiunge nella sezione ristretta, ovvero la sezione minima dell'ugello

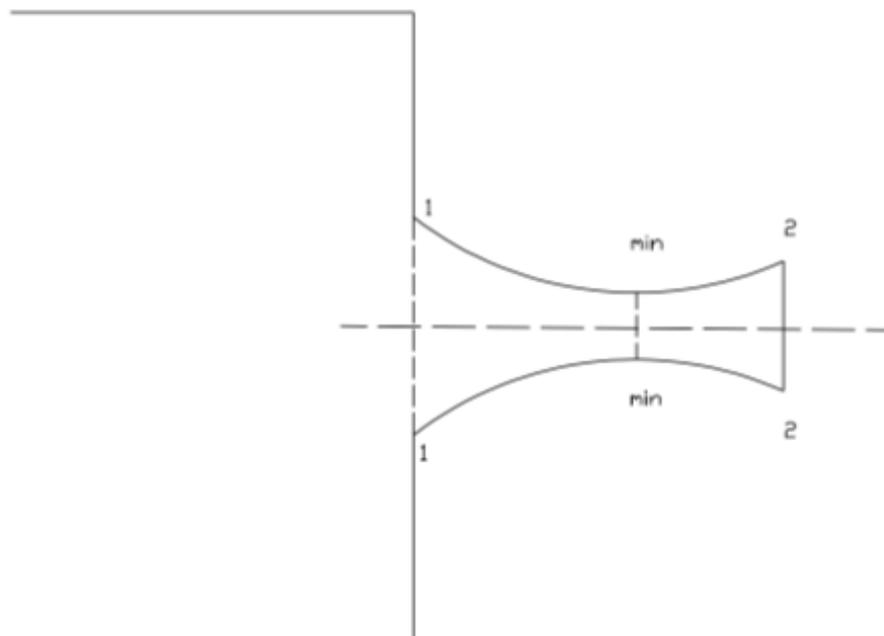


Figura 40: Ugello convergente-divergente

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Per quanto riguarda la pressione, bisogna prima introdurre due ulteriori concetti, ovvero la “pressione limite” e la “pressione di adattamento”.

Nel caso di ugello convergente-divergente si hanno infatti i seguenti casi:

$p_2 > p_{lim} > p_{cr}$	Il gas si espande nel tratto convergente aumentando la sua velocità e successivamente nel tratto divergente si comprime decelerando.
$p_2 = p_{lim} > p_{cr}$	Il gas si espande nel tratto convergente aumentando la sua velocità fino al raggiungimento della velocità del suono e successivamente nel tratto divergente si comprime decelerando.
$p_2 = p_{ad} < p_{cr}$	Il gas si espande nel tratto convergente aumentando la sua velocità fino al raggiungimento della velocità del suono con continua espansione anche nel tratto divergente in cui si raggiungono delle velocità supersoniche. La pressione di adattamento può dunque essere definita come quel valore di pressione che permette il raggiungimento di un regime supersonico.
$p_2 < p_{ad}$	Stessa situazione di prima, ma questa volta la pressione di uscita sarà pari a quella di adattamento.
$p_{ad} < p_2 < p_{lim}$	In questo caso non vale più l'ipotesi di espansione isoentropica in quanto non verificandosi un'espansione completa fino alla pressione di adattamento si verificano delle discontinuità nell'andamento della velocità che provocano delle onde d'urto. Per questo motivo la velocità di efflusso finale risulta essere minore rispetto a quella massima raggiunta nei due precedenti casi.

Tabella 17: Casistica ugelli convergenti-divergenti

Di seguito una figura che può aiutare a visualizzare il fenomeno:

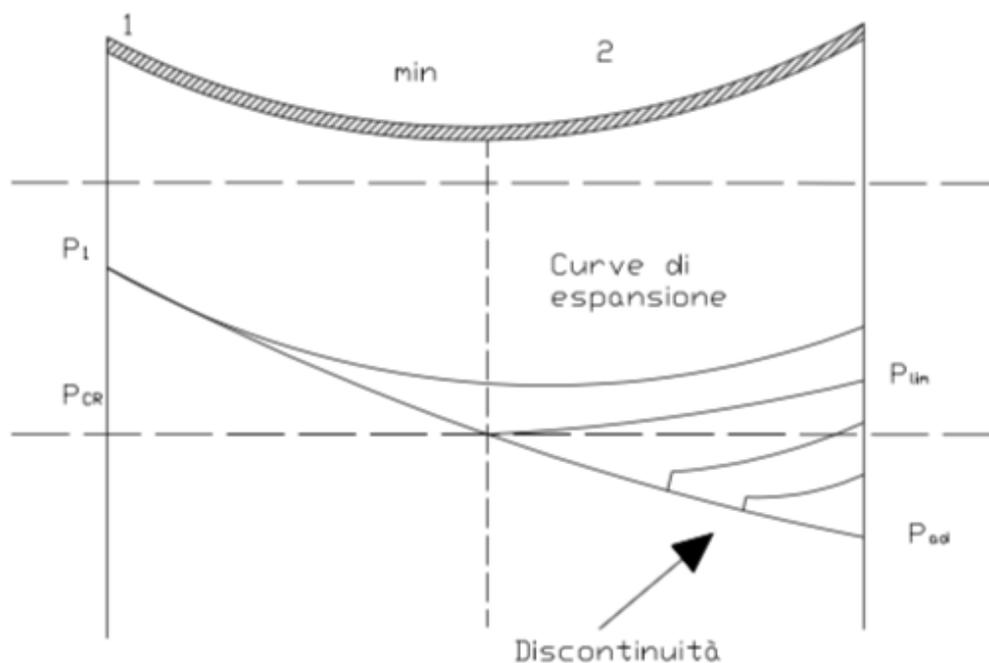


Figura 41: Andamento della portata in un ugello convergente-divergente

### 3.3.2 Lo pseudo-diametro

Si è già discusso nel precedente sotto paragrafo che per un rilascio di gas in atmosfera, nel momento in cui il rapporto tra le pressioni interna ed esterna diventa critico allora la velocità di efflusso del gas diventa pari a quella del suono. Per un ugello convergente però questa situazione si verifica localmente ed esattamente localizzata nella sezione di uscita. Nella stessa sezione la pressione del gas sarà invece ancora maggiore della pressione atmosferica, in quanto a causa della presenza fisica del ugello/foro non si verifica una espansione completa del gas fino alla pressione ambiente. In queste condizioni il gas completerà la propria espansione fino al valore di pressione atmosferica al di fuori dell'ugello cioè in campo aperto ed in maniera non controllata. In pratica è come se si trattasse a tutti gli effetti di un ugello convergente-divergente dove la sezione divergente risulta essere "virtuale". In tale sezione il gas si espanderà e la sua velocità supererà il limite sonico.

In questo paragrafo si approfondirà meglio l'analisi della fase di espansione libera in atmosfera con il fine di determinare la velocità finale del getto di gas in ambiente libero e la dimensione del getto la dove il gas ha completato la sua espansione fino al valore di pressione atmosferica. In questo caso si parlerà dunque di pseudo-sorgente ed in particolare con questo approfondimento si vuole valutare lo pseudo-diametro e la velocità finale del gas in campo aperto.

Il concetto di pseudo-diametro è stato introdotto per la prima volta da Hess et al. (1973) [32]. In questi studi fu che l'intensità della diluizione di un getto di gas super-critico in aria dipende da un valore di diametro che risulta essere maggiore di quello della sorgente, tale diametro fu denominato appunto pseudo-diametro.

Questo presupposto teorico fu poi sperimentalmente provato con getti sperimentali di azoto a 6,6 [bar]. Successivamente Birch et al. (1983) [33] utilizzarono questa teoria per i loro studi sperimentali sui getti super-critici di metano con rilasci fino a 70 [bar]. Lo studio di Birch et al. è molto importante in quanto ha permesso di verificare sperimentalmente la teoria.

Birch et al. ipotizzarono che durante l'espansione libera in atmosfera, il gas conservasse la propria massa e che il profilo di velocità nella sezione dove si raggiunge lo pseudo-diametro sia uniforme e pari alla velocità sonica alla temperatura atmosferica.

Si prenda ora in considerazione un rilascio super-critico da un foro con diametro  $d$  su un serbatoio di capacità infinita come mostrato nella seguente figura:

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

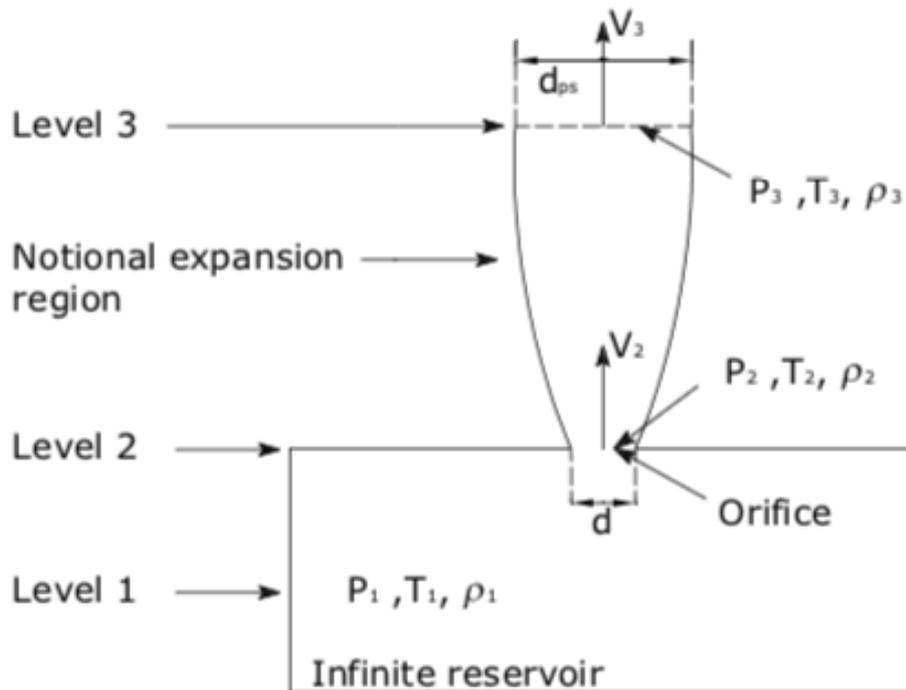


Figura 42: Efflusso super-critico

L'area del getto può essere idealmente suddivisa in 3 diversi livelli:

- Livello 1: Condizioni all'interno del serbatoio di capacità infinita;
- Livello 2: Condizioni nella sezione del foro;
- Livello 3: Condizioni del getto espanso in ambiente libero

In una prima versione dello studio Birch ipotizzo la sola conservazione della massa tra le sezioni 2 e 3. Egli impose che la portata fosse uguale nei due livelli:

$$Q_2 = Q_3$$

Questa ipotesi implica che tra il livello 2 e il 3 non sussista alcun fenomeno di diluizione dell'aria (entrainment). Per cui si ha

$$\frac{\pi}{4} C_D d^2 \rho_2 w_{s2} = \frac{\pi}{4} C_D d_{ps}^2 \rho_3 w_{s3}$$

Dove

- $C_D \leq 1$  è il coefficiente di scarico che tiene conto delle perdite di carico nell'ugello

$$C_D = C_f C_c \text{ dove } \begin{cases} C_f = \text{coefficiente di attrito} \\ C_c = \text{coefficiente di contrazione} \end{cases}$$

- $w_{s2}$  e  $w_{s3}$  sono le velocità del suono rispettivamente nel livello 2 e 3

In questo primo studio Birch ipotizza, infatti, che l'espansione libera del gas avvenga tra due valori di velocità del suono.

Si ricava dunque semplicemente:

$$d_{ps} = d \sqrt{C_D \frac{w_{s2} \rho_2}{w_{s3} \rho_3}}$$

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci  
accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Sorge però un problema: le condizioni nel livello 2 sono sconosciute, per cui considerando l'espansione all'interno dell'ugello adiabatica ed isoentropica, ovvero:

$$p_2 = p_1 \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

$$T_2 = T_1 \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)$$

Si ottiene la seguente espressione

$$d_{ps} = d \sqrt{C_D \frac{p_2}{p_3} \left( \frac{T_3}{T_2} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}}} \quad (20)$$

L'equazione (20) fu dunque il risultato del primo studio condotto da Birch, ovvero l'espressione dello pseudo-diametro in caso di sola conservazione della massa tra i livelli 2 e 3.

In un secondo momento (1986) Birch et al. [34] riconsiderarono le ipotesi fatte, e questa volta oltre alla massa impoerò che tra i livelli 2 e 3 si conservasse anche la quantità di moto.

Ipotizzando inoltre nulli sia gli attriti sia l'entrainment tra i livelli 2 e 3, si possono riscrivere le equazioni di conservazione della massa e di quantità di moto come segue:

$$\begin{cases} \rho_3 A_3 w_3 = \rho_2 A_2 w_2 C_D \\ \rho_3 A_3 w_3^2 = \rho_2 A_2 w_2^2 C_D^2 + A_2 (p_2 - p_3) \end{cases}$$

Si risolve il precedente sistema imponendo  $p_3 = p_a$  e si ricavano i valori di  $w_3$  e  $A_3$  procedendo come segue

$$A_3 = A_2 \frac{\rho_2 w_2^2 C_D^2 + p_2 - p_a}{\rho_3 w_3^2}$$

E sostituendo nell'equazione di conservazione della massa:

$$w_3 = w_2 \frac{\rho_2 C_D}{\rho_3} \frac{\rho_3 w_3^2}{\rho_2 w_2^2 C_D^2 + p_2 - p_a}$$

Ipotizzando che la temperatura nel livello 3 sia uguale al valore della temperatura di stagnazione nel livello 1 (ipotesi verificata sperimentalmente)  $T_3 \cong T_1$  e riprendendo ancora una volta l'ipotesi di espansione adiabatica ed isentropica valgono le seguenti espressioni:

$$\frac{p_2}{p_3} = \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

$$\rho_2 = p_1 \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \frac{PM}{RT_3}$$

$$w_2 = \sqrt{\frac{RT_1}{PM} \left( \frac{2\gamma}{\gamma + 1} \right)}$$

Dove PM è il peso molecolare del gas ed R la costante universale dei gas. Dopo una serie di passaggi matematici e assumendo d pari al diametro del foro di uscita si ottengono le seguenti espressioni. Va precisato che le espressioni riportate di seguito non sono uguali a quelle

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

riportate da Birch et al. nella loro pubblicazione in quanto non sono state utilizzate le stesse semplificazioni utilizzate dai due ricercatori ma sono state applicate le stesse ipotesi utilizzate in un lavoro di ricerca per la simulazione di rilasci sperimentali di idrogeno. [35]

$$w_3 = \sqrt{R^*T_1 \left(\frac{2\gamma}{\gamma+1}\right)} \left\{ C_D + \frac{\left[\left(\frac{2\gamma}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} - \frac{p_a}{p_1}\right]}{\gamma C_D \left(\frac{2\gamma}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}} \right\} \quad (21)$$

$$d_{ps} = d \sqrt{\frac{p_1}{p_a} \frac{\left(\frac{2\gamma}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} (\gamma C_D^2 + 1) - \frac{p_a}{p_1}}{\frac{2\gamma}{\gamma+1} \left[ C_D + \frac{\left[\left(\frac{2\gamma}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} - \frac{p_a}{p_1}\right]}{\gamma C_D \left(\frac{2\gamma}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}} \right]}} \quad (22)$$

### 3.3.3 Scelta dei parametri per la simulazione del rilascio reale

Si è già anticipato in precedenza che i rilasci incidentali avvengono di solito per cedimenti locali o totali della struttura presa in esame:

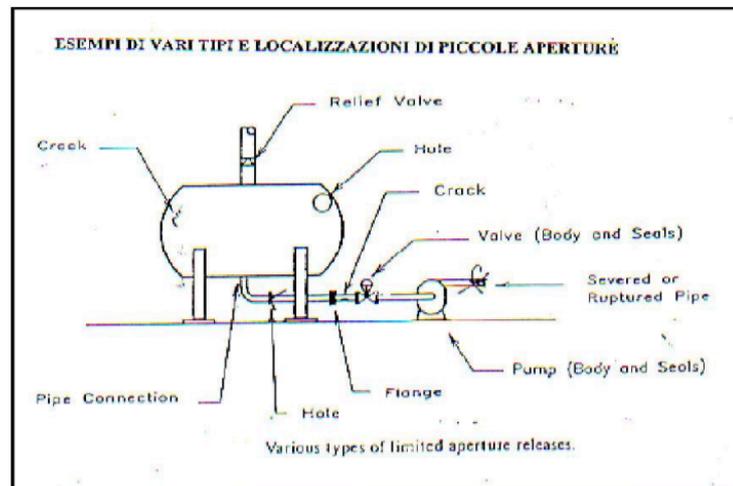


Figura 43: Esempi di vari tipi di localizzazione di fori

Il cedimento di tali strutture può essere dovuto a

- Urti esterni
- Errori operativi
- Fatica
- Infragilimento dovuto ad erosione o corrosione

Di seguito saranno descritti tutti i criteri decisionali che hanno portato a settare tutte le condizioni al contorno per le simulazioni dei rilasci, come ad esempio dimensioni del foro di uscita, condizioni di pressione e temperatura.

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

### 3.3.4 Dimensione del diametro di rottura

La dimensione del diametro di rottura è una scelta fondamentale per quanto riguarda il rilascio di gas in quanto influenza fortemente il flusso di massa rilasciata.

Per la scelta di tale parametro ci si è riferiti all'*OGP Risk Assessment* che è un report redatto dall'Association of Oil & Gas Producers. In particolare nell'Appendice 1 del Report 434 [36] sono presenti delle tabelle che riportano in base alla tipologia di componente, la frequenza degli incidenti di rilascio di gas durante i vari processi che avvengono in una piattaforma offshore.

In particolare gli oggetti che in tale report, in base ad un'analisi storica degli incidenti, sono analizzati in quanto ritenuti importanti per quanto riguarda rilasci incidentali sono i seguenti:

- Tubazioni per fluidi di processo
- Flange
- Valvole (manuali e automatiche)
- Serbatoi in pressione
- Pompe
- Compressori
- Scambiatori di calore
- Filtri
- Pig Traps

Inoltre nel report viene fatta una importante differenza per quanto riguarda i rilasci di gas. Essi infatti in base all'analisi storica degli incidenti, risultano divisi in tre macro-gruppi [36]:

1. Rilasci completi: Sono quei rilasci che iniziano a partire dalle condizioni operative dell'apparecchiatura considerata e continuano o fino quando interviene il sistema di emergenza (ESD) o nei casi peggiori fino a quando viene riversato tutto il contenuto di gas presente.
2. Rilasci Limitati: Sono i casi di rilascio in cui la pressione è comunque diversa da zero, ma la quantità di gas rilasciata è decisamente inferiore rispetto ad un rilascio completo. Questo perché ad esempio c'è stato un intervento da parte degli operatori che hanno intercettato il rilascio.
3. Rilasci a pressione nulla: Sono casi in cui la pressione all'interno dell'oggetto considerato è virtualmente nulla. Questo perché l'apparecchiatura ha una pressione di esercizio nulla come ad esempio negli open drains oppure l'apparecchiatura è stata depressurizzata per effettuare un intervento manutentivo. Va fatto notare che questo caso di rilascio viene normalmente escluso dall'analisi QRA.

Di seguito un esempio di tabella che si può trovare in tale report:

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

**Pressure vessel release frequencies (per vessel year; connections 50 to 150 mm diameter)**

<b>HOLE DIA RANGE (mm)</b>	<b>ALL RELEASES</b>	<b>FULL RELEASES</b>	<b>LIMITED RELEASES</b>	<b>ZERO PRESSURE RELEASES</b>
1 to 3	9.6E-04	3.9E-04	3.5E-04	1.8E-04
3 to 10	5.6E-04	2.0E-04	2.0E-04	1.4E-04
10 to 50	3.5E-04	1.0E-04	1.2E-04	1.2E-04
>50	2.8E-04	5.1E-05	7.9E-05	1.8E-04
<b>TOTAL</b>	<b>2.2E-03</b>	<b>7.4E-04</b>	<b>7.4E-04</b>	<b>6.3E-04</b>

*Tabella 18: Frequenze di rilascio per un serbatoio in pressione [36]*

La tabella precedente si riferisce a frequenze di rilasci da fori variabili per un vessel in pressione. Si può subito notare come i rilasci più probabili siano quelli da fori piccoli e medi, mentre sono meno probabili rilasci con diametri di rottura maggiori di 50 mm. Appurato ciò per gli obiettivi di tale elaborato saranno considerati solamente i fori medi, in quanto l'ordine di grandezza della frequenza di rilascio è uguale a quelli piccoli, e si è preferito avere un rilascio più corposo per poter tracciare meglio l'inquinante. In particolare saranno studiati quelli compresi nel range 10-50 [mm] con particolare attenzione al foro da 30 mm che ci è sembrato un buon compromesso.

### **3.3.5 Pressione e temperatura di rilascio**

La pressione di rilascio del gas è uno dei parametri più importanti per quanto riguarda l'efflusso in quanto influenza fortemente le caratteristiche del rilascio.

Analizzando le pressioni operative delle apparecchiature o dei classici serbatoi di gas in pressione che sono ospitati in piattaforma ed in particolar modo nel deck di produzione. Esse vanno da un minimo di pochi bar fino a valori superiori anche agli 80 Bar.

In particolare per le simulazioni dei rilasci reali, con il fine di scegliere il miglior gas per la simulazione in questo elaborato si è optato per una pressione operativa di 65 [Bar] ed una temperatura di 70°C.

Tali caratteristiche potrebbero ad esempio essere le caratteristiche operative di un classico separatore ad alta pressione, che può essere considerato un ottimo candidato per un eventuale rilascio.

## **3.4 Simulazioni rilascio reale**

Nel seguente paragrafo sono riportati i grafici che mostrano le simulazioni di rilascio di gas in condizioni reali, con il modello discusso nel paragrafo 3.3.1

In Tabella 19 sono riassunti tutti i parametri utilizzati per tali simulazioni, dove oltre ai parametri di pressione, temperatura e diametro del foro discussi, compaiono anche il volume del serbatoio e il coefficiente di rilascio.

Per quanto riguarda il volume del serbatoio, esso è stato scelto in maniera arbitraria, in quanto non influenza tanto la portata quanto più la massa totale rilasciata, ed inoltre l'analisi non sarà svolta fino al completo svuotamento del serbatoio

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Per quanto riguarda il coefficiente di rilascio è stato impostato a 0,8 indicando dunque un foro piuttosto regolare.

Parametri rilascio reale	
Volume serbatoio [m <sup>3</sup> ]	5
Pressione operativa [Bar]	65
Temperatura operativa [°C]	70
Diametro di rottura [m]	0,03
Coefficiente di rilascio C <sub>D</sub> [-]	0,8

Tabella 19: Parametri rilascio reale

Per quanto riguarda i tempi di rilascio si è deciso di stoppare il rilascio dopo 60 secondi, perché di solito questo è il tempo d'intervento del sistema di emergenza [36]

Di seguito in Figura 44 l'andamento delle portate di efflusso dei quattro gas proposti confrontati con la portata rilasciata di metano, analizzata in funzione del tempo di rilascio settato:

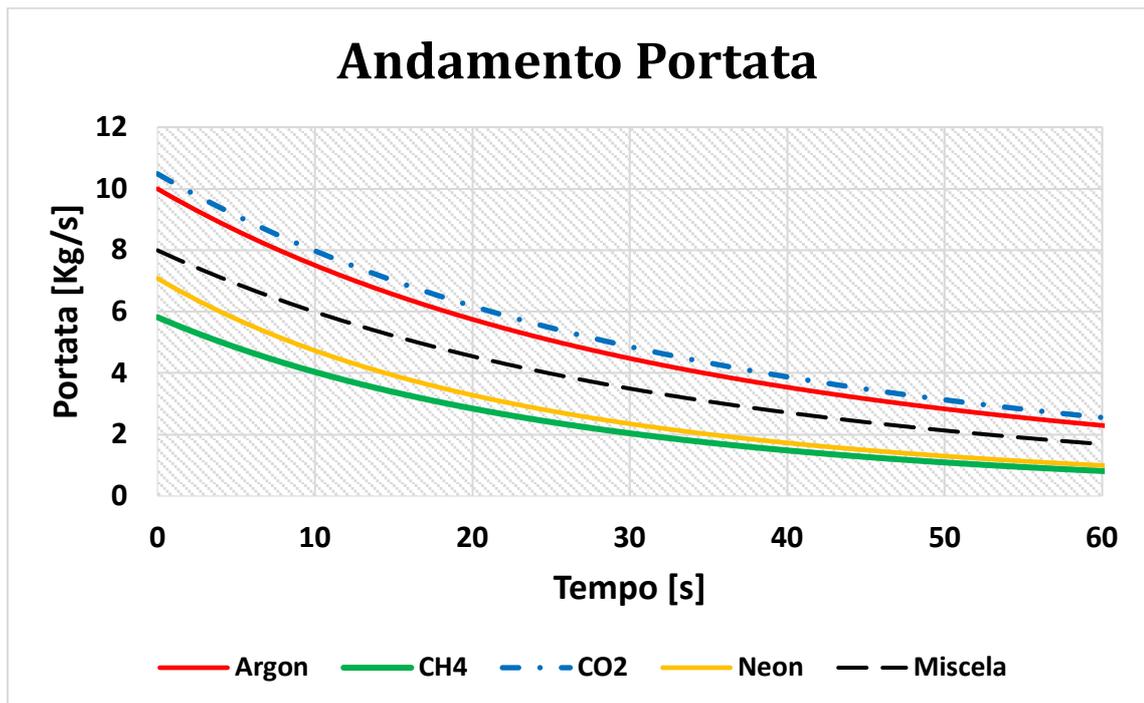


Figura 44: Andamento portata caso reale

Per il calcolo di tali portate è stata utilizzata la seguente equazione:

$$\dot{m} = \dot{m}_{cr} = C_D A_2 \sqrt{p_1 \rho_1} \sqrt{\gamma \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}$$

Che non è altro che la prima delle equazioni mostrate nel sistema (19) moltiplicata per il coefficiente di scarico che tiene conto delle perdite che si potrebbero verificare nella sezione del foro, dovute al fatto che il bordo di quest'ultimo non sarà sicuramente liscio ma avrà una contorno frastagliato.

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Si può subito notare come il Neon sia quello che approssima meglio l'andamento della portata di metano. Questo perché a parità di condizioni di rilascio (T e p) il valore di tale portata dipende fortemente dalle caratteristiche del gas, che in questo caso sono simili soprattutto per quanto riguarda la densità, che a parità degli altri fattori risulta quello più discriminante in questo caso.

Nella seguente Figura 45 è invece mostrato l'andamento della pressione allo sbocco, cioè immediatamente dopo la sezione del foro. In questo caso trattandosi di un efflusso sonico, tale pressione coinciderà con quella critica, che si può facilmente ricavare dall'equazione (16)

$$p_{cr} = p_1 \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

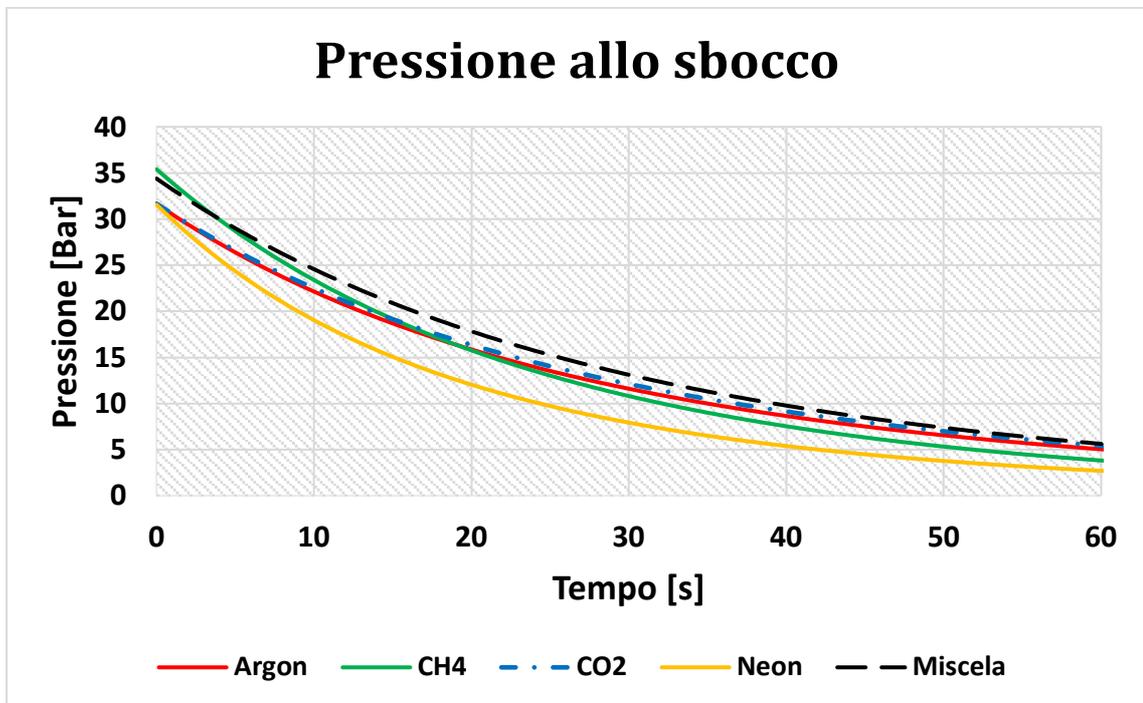


Figura 45: Andamento pressione allo sbocco caso reale

Per quanto riguarda la pressione di efflusso, si vede come la miscela in un primo momento approssimi meglio il comportamento del metano. Questo perché il rapporto tra i calori specifici tra metano e miscela è molto simile (1,31 per il metano contro l'1,40 della miscela). Andando avanti con la simulazione le due curve si allontanano tra di loro perché la variazione della pressione all'interno del serbatoio risulta più contenuta nel caso della miscela rispetto al metano, come mostrato nella Figura 46

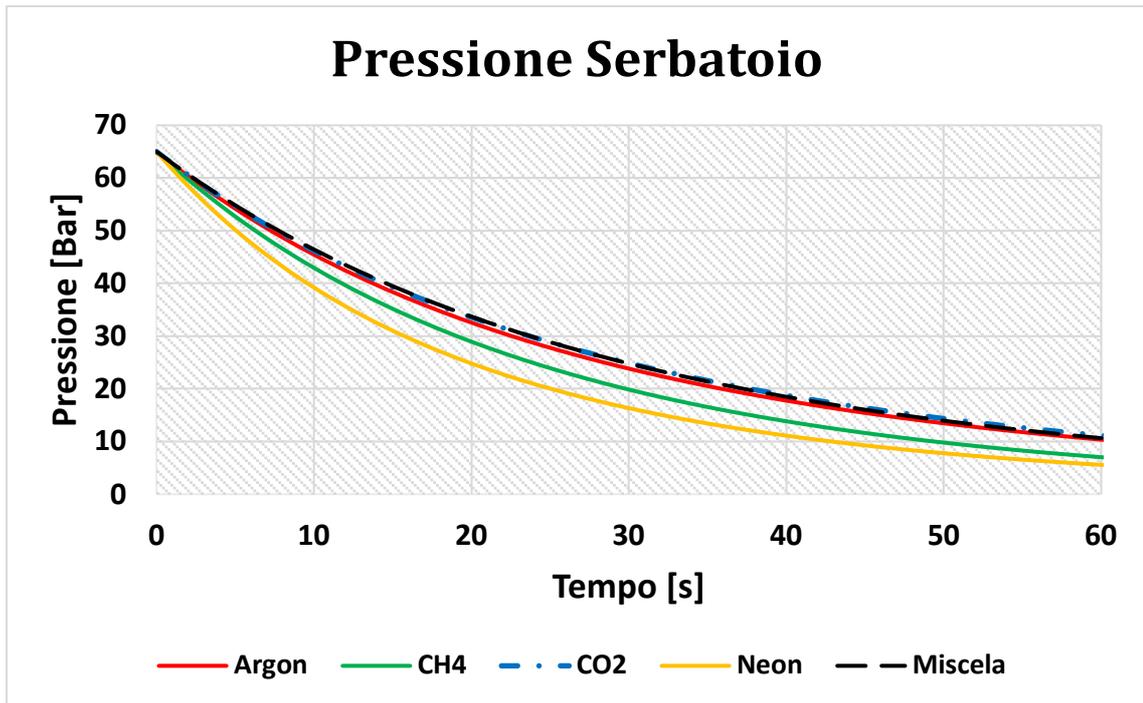


Figura 46: Andamento pressione nel serbatoio caso reale

L'andamento della pressione all'interno del serbatoio è stato calcolato avendo ipotizzato una espansione adiabatica al suo interno tra due istanti successivi

$$\frac{p_i}{\rho_i^\gamma} = cost \rightarrow p_{1,t+1} = p_{1,t} \left( \frac{\rho_{1,t+1}}{\rho_{1,t}} \right)^\gamma$$

Dove quando viene calcolata la pressione all'istante t+1 la densità allo stesso istante di tempo all'interno del serbatoio è nota, in quanto calcolata come rapporto tra la massa di gas rimasta nel serbatoio sul volume di quest'ultimo.

In tale grafico si nota come la miscela ha lo stesso comportamento dell'Argon e della CO<sub>2</sub> che mantengono un abbassamento di pressione meno marcato di quello del metano. Il Neon è quello che presenta l'abbassamento di pressione più accentuato e più confrontabile con quello del metano, questo perché la variazione di densità all'interno del box è simile per quest'ultimi.

Nel grafico successivo in Figura 47 è invece mostrato l'andamento della densità nella sezione di uscita. Anche in questo caso tale densità è stata valutata avendo ipotizzato una espansione adiabatica come già mostrato nel paragrafo 3.4.1

$$\frac{p_i}{\rho_i^\gamma} = cost \rightarrow \rho_2 = \rho_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{\gamma}}$$

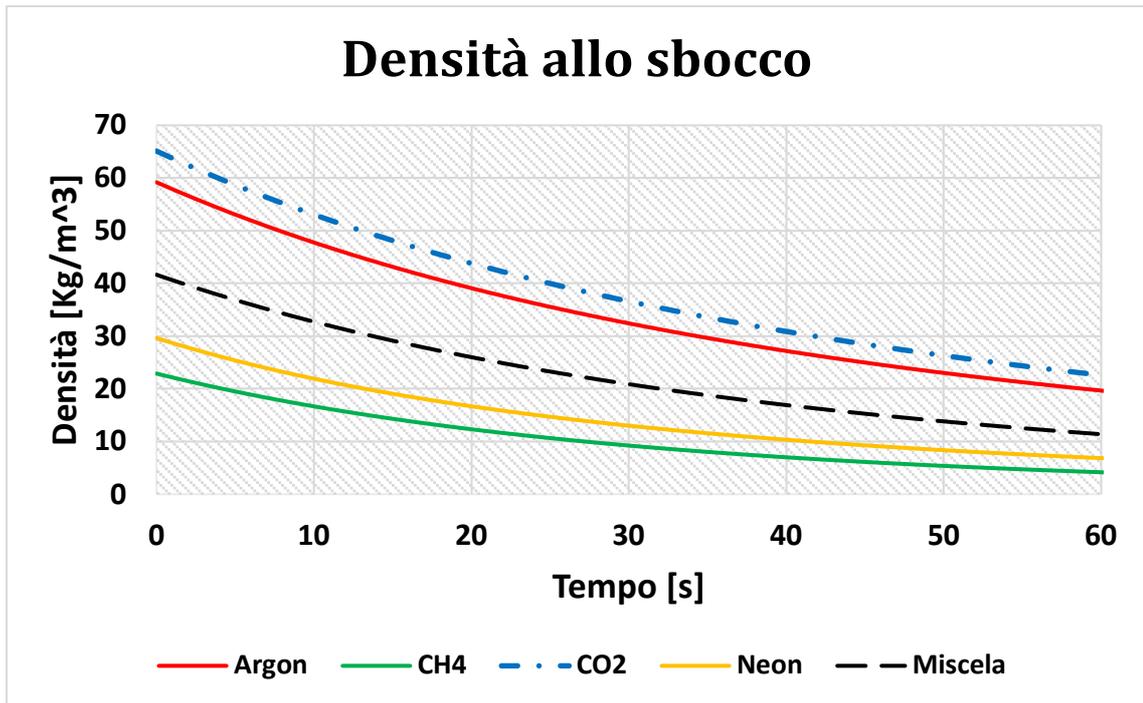


Figura 47: Andamento densità allo sbocco caso reale

Anche in questo caso il Neon risulta il migliore come approssimazione esattamente nella sezione di efflusso, ma questo era un risultato facile da aspettarsi in quanto per caratteristiche di densità sono simili e dunque l'andamento della densità all'interno del box è simile.

Infine nell'ultimo grafico mostrato in Figura 48 viene mostrato l'andamento della velocità dei 5 gas in campo aperto. Quando ovvero il fluido subisce un'ulteriore accelerazione raggiungendo velocità ultrasoniche, come già spiegato nel paragrafo 3.3.2

L'equazione utilizzata per il calcolo di tale velocità è la (21) mostrata nel paragrafo sopra citato e valutata a partire dalle considerazioni di Birch et al. [33][34]

Tale velocità come già anticipato rappresenta la velocità dei gas quando subiscono l'ulteriore fase di espansione dalla pressione che hanno raggiunto allo sbocco dell'ugello fino al valore di pressione ambiente.

Ancora una volta Argon e CO<sub>2</sub> si comportano in maniera analoga in quanto hanno caratteristiche intrinseche molto simili, e presentano un valore di velocità in campo aperto che risulta essere molto più basso di quello che ha il metano. Discorso diverso per miscela e Neon, che presentano un andamento di velocità simile tra di loro e come valori, seppur si mantengono ad una velocità più bassa di quella del metano, i valori sono confrontabili, siamo sull'ordine dei 600 [m/s] contro circa gli 800 [m/s] del metano. Si nota inoltre come a differenza del Neon, la miscela presenta una variazione più contenuta, questo perché la variazione di tale velocità dipende molto dalla variazione della pressione all'interno del box che come si è già visto risulta molto più contenuta per la miscela che per il Neon.

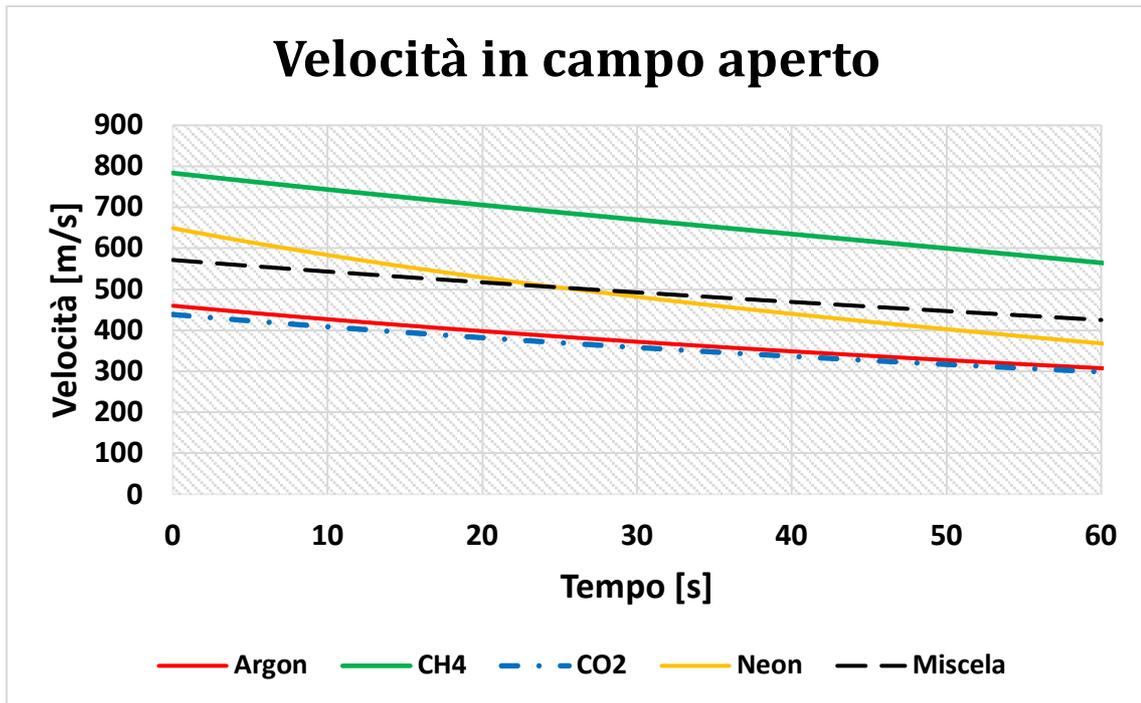


Figura 48: Andamento velocità in campo aperto caso reale

Da tutti i grafici riportati si è appurato che per la totalità delle grandezze che influenzano il rilascio, il Neon e la miscela sono sempre risultati i migliori per approssimazione delle curve con quelle del metano; dunque appurato ciò in fase di progettazione si è deciso di scartare la proposta di utilizzare Argon o Anidride Carbonica e le analisi successive verranno effettuate solamente per Neon e Miscela. La scelta definitiva di utilizzare l'uno piuttosto che l'altro sarà rimandata a considerazioni di altro tipo.

### 3.5 Simulazioni rilascio in laboratorio

In questo paragrafo, analogamente al precedente, si discuterà delle simulazioni del rilascio controllato all'interno del laboratorio e della scelta dei parametri che lo caratterizzano.

Iniziamo dalla pressione e temperatura, l'idea è quella di avere delle condizioni di rilascio che non risultino difficili da gestire e soprattutto pericolose per la sicurezza del personale che stazionerà in laboratorio. Per questo motivo si è deciso che il serbatoio che conterrà il gas e ne sosterrà il rilascio nel tempo sarà pressurizzato a 7 bar, che risulta essere un buon compromesso tra la volontà di mantenere delle condizioni operative non proibitive e l'aver un rilascio la cui pressione di efflusso sia abbastanza alta di quella ambiente.

Per quanto riguarda la temperatura, si è deciso che sia quella ambiente all'interno del box quindi è stata settata a 25°C.

Merita un discorso più approfondito la scelta della sezione dell'ugello. Per quanto riguarda quest'ultimo, si è voluto riscalarlo coerentemente con il modello della piattaforma anche la forma del foro. In particolare, si è detto in precedenza che il foro reale analizzato sarà quello il cui diametro risulta pari a 3 [cm]. Di conseguenza la sezione reale risulta pari a

$$A_{\text{foro, reale}} = \pi \frac{D^2}{4} = 7,07E^{-04} [m^2]$$

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci  
accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Si è dunque scalata con un fattore di scalatura 1:10 tale area reale, ottenendo il seguente valore

$$A_{foro,lab} = 7,07E^{-05} [m^2]$$

E a partire da questo valore di area ottenuto, tramite formula inversa, si è ricavato il valore del diametro che dovrà avere l'ugello, ovvero:

$$D_{ugello} = \sqrt{\frac{4A_{foro,lab}}{\pi}} = 0,0095 [m] = 9,5 [mm]$$

Si è inoltre supposto che l'ugello sia perfettamente liscio dunque

$$C_D = 1$$

Per quanto riguarda il volume del box che dovrà sostenere il rilascio è stato fissato a 5 [m<sup>3</sup>], la motivazione di questa scelta sarà giustificata più avanti.

Di seguito una tabella riepilogativa delle condizioni al contorno utilizzate per la simulazione:

<b>Parametri rilascio in laboratorio</b>	
<b>Volume serbatoio [m<sup>3</sup>]</b>	5
<b>Pressione box [Bar]</b>	7
<b>Temperatura box [°C]</b>	25
<b>Diametro ugello[mm]</b>	9,5
<b>Coefficiente di rilascio C<sub>D</sub> [-]</b>	1

*Tabella 20: Parametri rilascio in laboratorio*

In Figura 49 è mostrato l'andamento della portata nei 60 secondi di rilascio controllato analizzato.

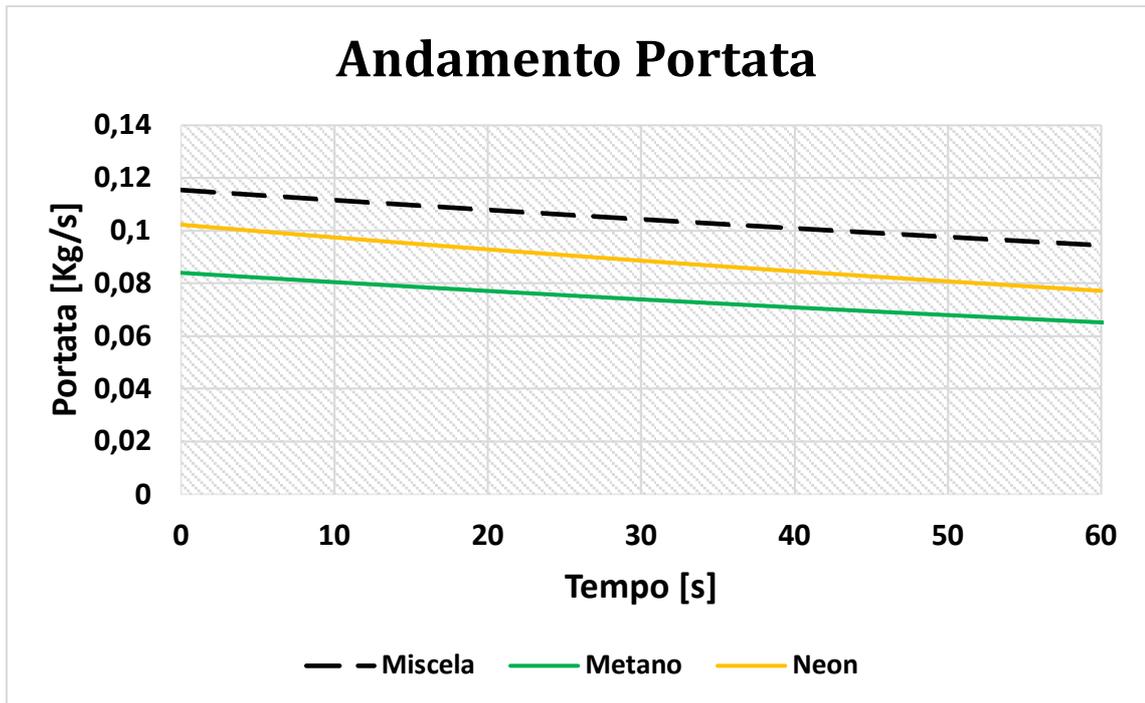


Figura 49: Andamento portata rilascio in laboratorio

Dal grafico precedente si può apprezzare la quasi-stazionarietà del rilascio sia per quanto riguarda il Neon, sia per quanto riguarda la miscela. Si nota inoltre subito come nel caso della miscela la portata rilasciata, che ricordiamo essere fortemente dipendente dalle caratteristiche del gas e delle condizioni di stoccaggio, risulta essere maggiore sia rispetto all'ipotetico rilascio di solo Metano sia a quella che si avrebbe in un ipotetico rilascio di Neon a quelle condizioni. Questo perché la densità del gas nella sezione di sbocco risulta molto maggiore rispetto alle altre due.

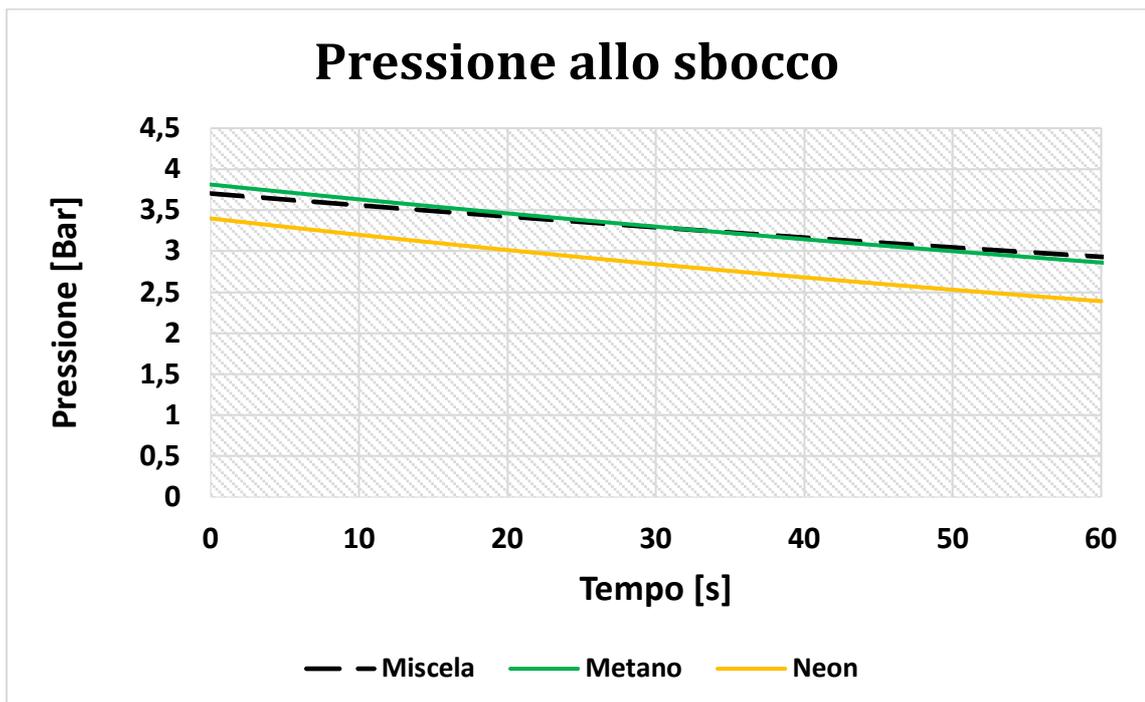


Figura 50: Andamento pressione di efflusso in laboratorio

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Per quanto riguarda la pressione dei gas allo sbocco, cioè immediatamente dopo la sezione dell'ugello si vede subito come la pressione della miscela sia praticamente coincidente con quella del metano, e questo è un ottimo punto a favore per la miscela in quanto essa è perfettamente in grado di simulare l'eventuale pressione di rilascio di un getto di metano.

Esse coincidono quasi perfettamente in quanto il valore di tale pressione dipende dal rapporto critico, che è a sua volta una funzione del parametro  $\gamma$  che risulta essere rispettivamente 1,31 per il metano ed 1,4 per la miscela, dunque molto simili. Inoltre il valore della pressione di efflusso è fortemente legato al valore della pressione di stagnazione del gas, ovvero quella all'interno del box e come si può apprezzare dal grafico in Figura 51 la variazione nel tempo di quest'ultimo parametro per i due gas è molto simile.

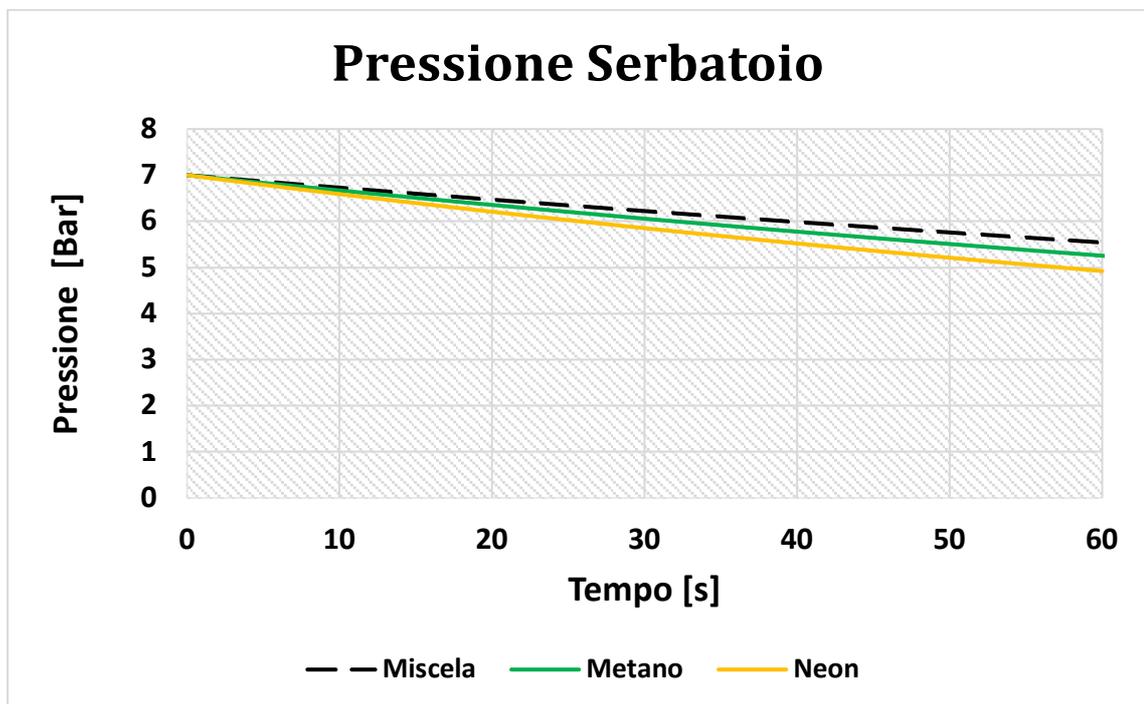


Figura 51: Andamento pressione all'interno del box

Per quanto riguarda la densità nella sezione dell'ugello per i tre gas, essa è mostrata nella figura successiva Figura 52

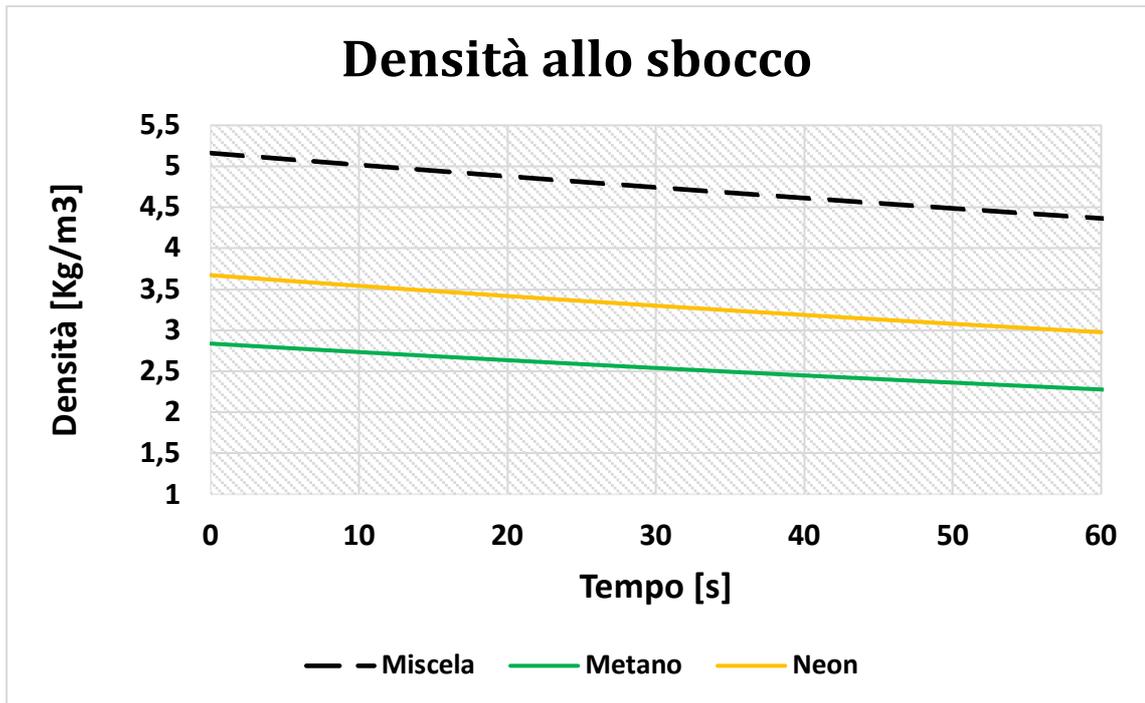


Figura 52: Andamento densità allo sbocco in laboratorio

Si vede subito come la curva corrispondente al Neon approssimi meglio il comportamento del metano per quanto riguarda la densità allo sbocco, in quanto i valori sono confrontabili. Discorso diverso per la miscela, la cui densità allo sbocco risulta quasi doppia rispetto a quella del Metano. Va però fatta una precisazione, nella sezione di sbocco, immediatamente dopo l'ugello, il gas non ha ancora completato del tutto la sua espansione, che invece continuerà ancora in campo aperto fino al raggiungimento della pressione ambiente. Una volta completato il processo di espansione, la nube di gas si riscalderà e per quanto riguarda la miscela il metano si separerà da essa e si comporterà in quanto tale quindi in realtà ad espansione ultimata in un'ottica di tracciamento del gas il fatto che la densità di sbocco come miscela sia più alta lo si può considerare ininfluenza.

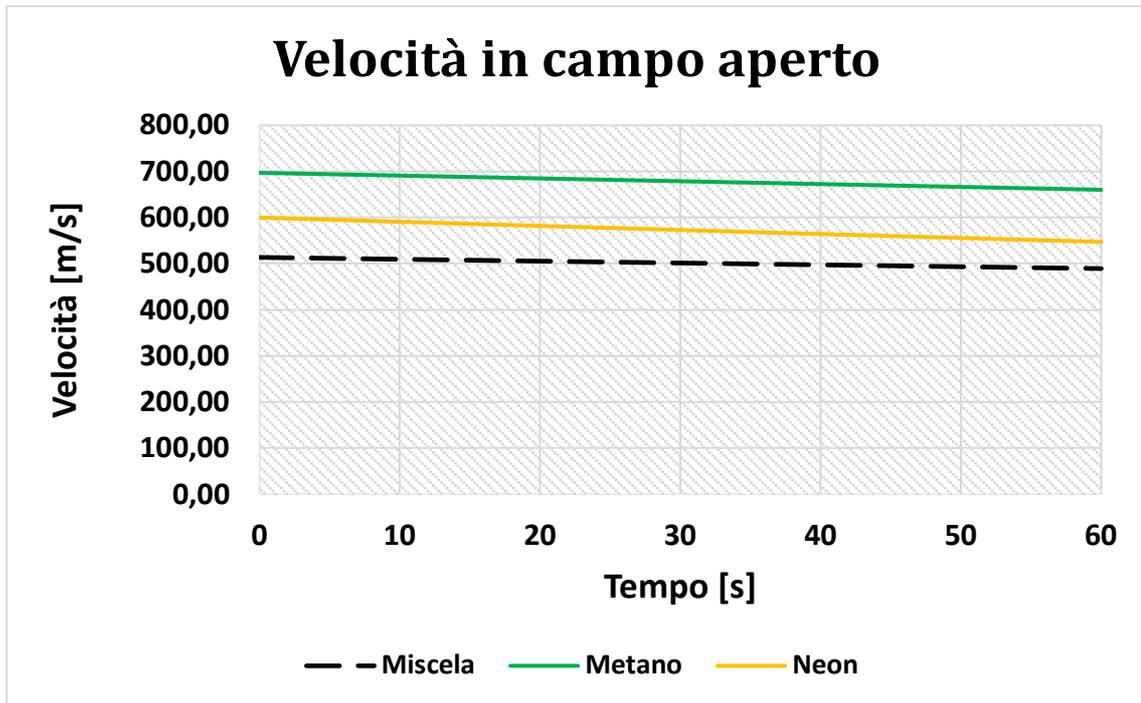


Figura 53: Andamento della velocità in campo aperto in laboratorio

In Figura 53 è invece mostrato l'andamento delle velocità in campo libero, cioè quando il gas completa la sua espansione dal valore di pressione critica che raggiunge allo sbocco dell'ugello fino alla pressione ambiente, dove dunque accelera ulteriormente passando da valori di velocità sonici, che in questo caso risultano essere 316 [m/s] per la miscela, 418 [m/s] per il metano e 394 [m/s] per il Neon, a valori supersonici. Come infatti è stato spiegato nei paragrafi 3.3.1 e 3.3.2 il fluido subisce una ulteriore accelerazione come se si trovasse in ugello convergente-divergente.

Dal grafico si vede che il valore di velocità della miscela è il più basso dei tre ed inoltre si nota una differenza rispetto al medesimo grafico nel caso reale. Nel grafico reale in Figura 48: Andamento velocità in campo aperto caso reale la pendenza della curva relativa al Neon è più accentuata rispetto a quella relativa alla miscela, questo perché il valore di tale velocità è legato alla variazione della pressione all'interno del box/serbatoio, ma mentre nel caso reale le variazioni delle pressioni all'interno del serbatoio sono molto accentuate e questo è vero in particolare per il Neon, nel caso in laboratorio tali variazioni sono molto più contenute. Questo perché a parità di volumi considerati essendo la pressione più bassa causa anche un gradiente di pressione meno accentuato.

A differenza del rilascio reale per la simulazione del rilascio in laboratorio vale la pena calcolare la grandezza dello pseudo-diametro, introdotto nel paragrafo 3.3.2. Esso non è altro che il diametro che raggiunge la nube nella sezione in cui ha completato l'espansione fino a pressione ambiente. In Tabella 21 si possono visualizzare i valori per i tre gas nell'istante iniziale del rilascio. Si nota subito come tutti e tre i valori sono di un ordine di grandezza più grandi rispetto al diametro dell'ugello e sono tutti e tre confrontabili.

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Pseudodiametro [cm]	
Metano	3,5
Neon	3,8
Miscela	3,6

Tabella 21: Valori dello pseudodiametro per il rilascio in laboratorio

A questo punto dell'analisi si è mostrato come ancora entrambi i gas analizzati fino a questo momento possano andare bene per simulare il rilascio di metano, quindi per effettuare una scelta finale si è proceduto con un'analisi dei consumi e dunque dei costi. Affidando la scelta tra i due gas a delle considerazioni economiche dalle quali non ci si può esulare.

### 3.6 Analisi dei consumi

Nel seguente paragrafo sarà dunque proposta un'analisi dei consumi del gas per poter prevedere i costi per singola prova. Per ogni gas sarà analizzata una singola prova con diverse durate di rilascio, anche se al momento come già anticipato la durata dei rilasci dovrebbe essere fissata ad 1 minuto, e saranno anche mostrati i consumi di gas per un numero di prove pari a 2,3,5 e 10.

I valori di massa rilasciata per singola prova sono stati ottenuti banalmente come:

$$M_{ril} = G\Delta t$$

Dove  $\Delta t$  è la durata del rilascio espressa in secondi.

Considerando che la portata calcolata per la miscela risulta essere:

$$G_{ril,miscela} = 0,115 \left[ \frac{Kg}{s} \right]$$

Si sono ottenuti i seguenti risultati

Consumi di miscela per singola prova			
Tempi rilascio	T=1 [min]	T=2 [min]	T=3 [min]
Massa ril [Kg]	6,93	13,85	20,78

Tabella 22: Massa di miscela rilasciata per singola prova

Consumi in Kg di miscela			
#Prove	Tempi		
	T=1 [min]	T=2 [min]	T=3 [min]
2	13,85	27,71	41,56
3	20,78	41,56	62,34
5	34,63	69,27	103,90
10	69,27	138,53	207,80

Tabella 23: Massa di miscela rilasciata per più prove

Analogamente per il Neon, si era ottenuta una portata rilasciata pari a

$$G_{ril,neon} = 0,102 \left[ \frac{Kg}{s} \right]$$

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Con tale valore di portata rilasciata i consumi previsti sono i seguenti:

Consumi di Neon per singola prova			
Tempi rilascio	T=1 [min]	T=2 [min]	T=3 [min]
Massa ril [Kg]	6,14	12,27	18,41

Tabella 24: Massa di neon rilasciata per singola prova

Consumi in Kg di Neon			
#Prove	Tempi		
	T=60 [s]	T=2 [min]	T=3 [min]
2	12,27	24,55	36,82
3	18,41	36,82	55,23
5	30,68	61,37	92,05
10	61,37	122,74	184,10

Tabella 25: Massa di neon rilasciata per più prove

Confrontando i valori per entrambi i gas, per il rilascio di 1 minuto, che ad oggi risulta essere quello scelto si ottiene il seguente istogramma:

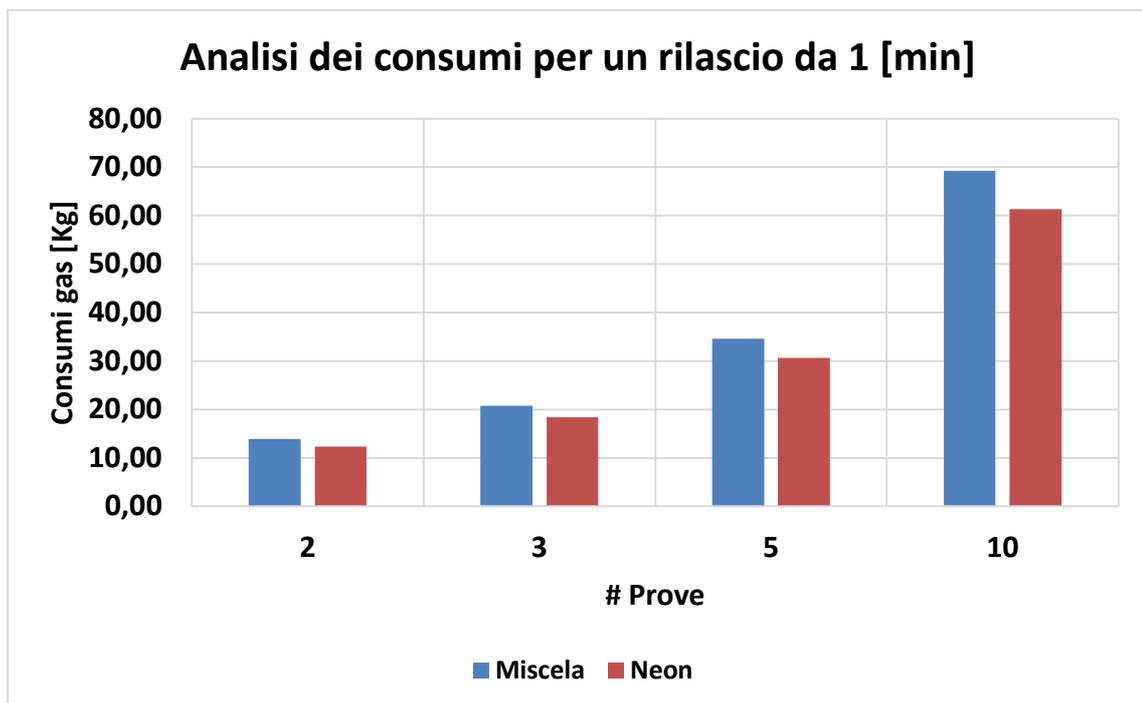


Figura 54: Analisi dei consumi per un rilascio di 1 minuto

Si può subito vedere come i consumi di Neon in Kg sono più contenuti rispetto a quelli della miscela, come ci si aspettava facilmente dai valori di portata massica ottenuti.

A questo punto sono stati contattati vari fornitori di gas per cercare di capire quanto tali consumi incidessero sul budget complessivo e dunque virare la scelta su uno piuttosto che l'altro gas.

I tagli di bombole forniti dai fornitori sono i seguenti:

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

	Volume Bombola [L]	Pressione [bar]	Massa contenuta [Kg]	Prezzo [€]
Neon	50	200	8,2	3300
Miscela	50	200	11,64	180

Tabella 26: Preventivi bombole

Considerando che le bombole dovranno essere riconsegnate al fornitore con una pressione residua pari al 10% di quella originale e tenendo conto della massa rilasciata in un minuto si è calcolato il numero di prove per bombola con la seguente:

$$\frac{\#Prove}{Bombola} = \frac{M_{bombola,200[Bar]} - M_{bombola,20[Bar]}}{M_{rilasciata,1 [min]}}$$

Si ottengono rispettivamente i seguenti valori per Neon e Miscela

$$\frac{\#Prove_{Neon}}{Bombola_{Neon}} = 1,2$$

$$\frac{\#Prove_{Miscela}}{Bombola_{Miscela}} = 1,5$$

E sfruttando il prezzo per bombola fornito da preventivo si sono ottenuti i seguenti costi per prova:

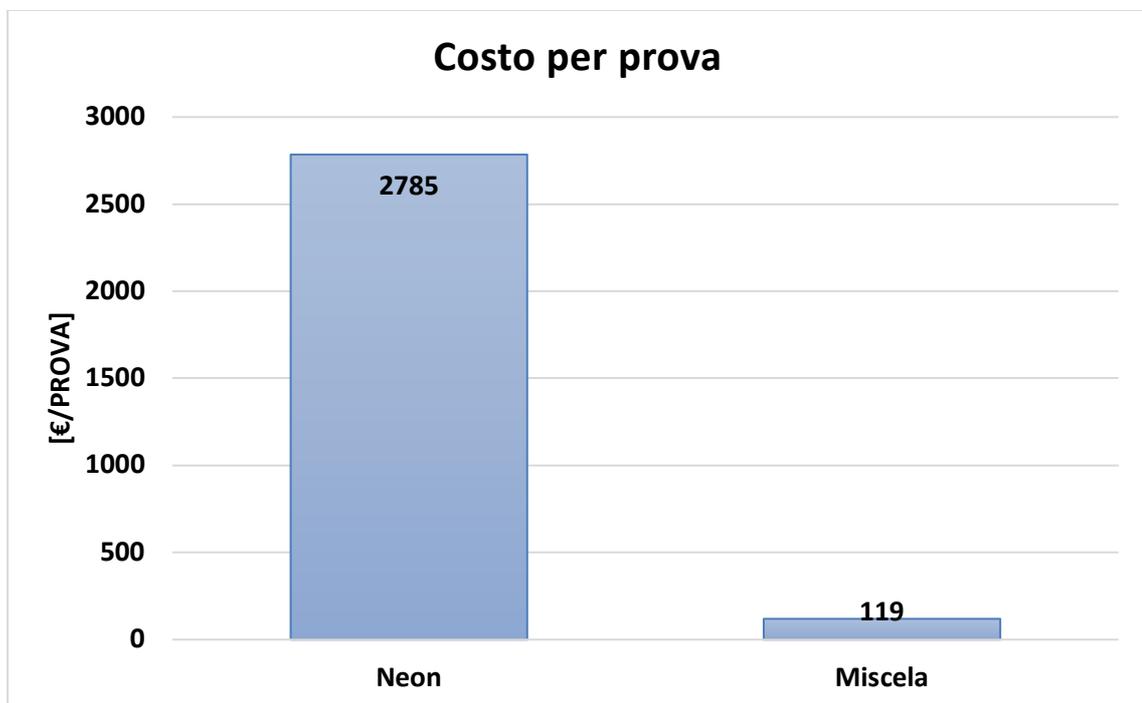


Figura 55: Costo unitario per prova effettuata

A questo punto guardando la Figura 55 visto il costo molto elevato del Neon sembra scontato optare per la miscela, che sarà dunque il gas ufficialmente utilizzato per le prove in laboratorio.

### 3.7 Dimensionamento dell'impianto per il rilascio del gas

In questo paragrafo verranno illustrati tutti i criteri decisionali alla base delle scelte effettuate per il dimensionamento del sistema di distribuzione del gas, dalla zona che sarà adibita allo stoccaggio fino alla zona di prova in cui è localizzato il mock-up.

#### 3.7.1 Descrizione generale dell'impianto

Di seguito in Figura 56 è mostrato lo schema di impianto semplificato che si prevede di utilizzare:

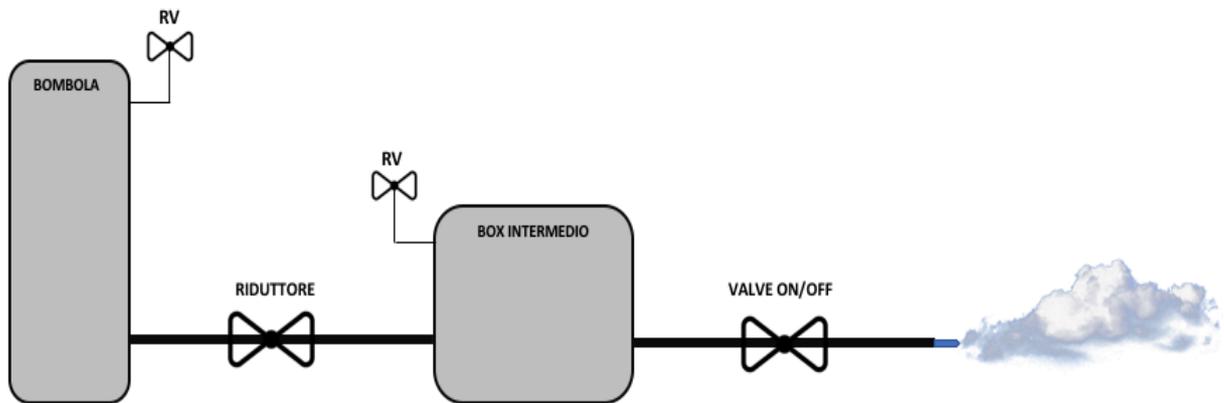


Figura 56: Schema dell'impianto di distribuzione gas

Esso risulta formato in prima approssimazione dai seguenti oggetti

- Bombola di stoccaggio del gas con relativa valvola di sicurezza;
- Riduttore: Questo sarà necessario per abbassare la pressione della bombola (200 Bar) alla pressione operativa del box, che sarà di 7 bar;
- Box intermedio con relativa valvola di sicurezza: L'obiettivo di tale box intermedio è quello di fungere da polmone per sostenere il rilascio di gas nel tempo;
- Valvola ON/OFF comandata direttamente dalla sala controllo per fare partire o fermare il rilascio.
- Ugello la cui sezione di uscita, come visto in precedenza, sarà pari a 9,5 [mm]

Si sono già descritte le caratteristiche del tipo di bombola che sarà utilizzato in Tabella 26: Preventivi bombole, essa avrà un taglio di 50 L con pressione di stoccaggio di 200 Bar.

Un discorso a parte merita la scelta del volume del box intermedio che sarà trattata nel sotto paragrafo successivo.

#### 3.7.2 Scelta del volume del box intermedio

Per quanto riguarda il box intermedio, bisogna innanzitutto chiarirne la funzionalità. Esso è stato previsto per evitare di gestire il rilascio direttamente dalla bombola. Il suo obiettivo è dunque quello di fungere da polmone e sostenere il rilascio durante tutta la sua durata. L'idea progettuale alla base della scelta di quest'ultimo è stata quella di avere un serbatoio che fosse abbastanza grande da fare in modo che durante la fase di rilascio tutti i parametri di quest'ultimo rimangano costanti. Ovviamente quest'idea si scontra con gli effettivi spazi a disposizione, quindi non si può avere tale box grande a dismisura.

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Di seguito sono stati considerati due possibili volumi di tale serbatoio, ed è stato analizzato un rilascio di miscela con le stesse condizioni già descritte in Tabella 20 variando il volume del box da 5 [m<sup>3</sup>] a 10 [m<sup>3</sup>], con l'obiettivo di studiare la variazione delle grandezze tipiche del rilascio come portata, pressione, densità ecc.. per entrambi i casi.

La variazione delle grandezze è stata calcolata considerando il loro valore nel primo istante di rilascio e nel sessantesimo istante, e pesando tale variazione sul valore all'istante iniziale.

Ad esempio per la portata rilasciata:

$$\text{Variazione}_{\dot{m}}\% = \frac{\dot{m}_{t=1} - \dot{m}_{t=60}}{\dot{m}_{t=1}} \cdot 100$$

Analogamente per tutte le altre grandezze.

E si ottengono i seguenti valori mostrati nelle seguenti Tabella 27 per il volume di 5 [m<sup>3</sup>] e Tabella 28 per il volume di 10 [m<sup>3</sup>]

<b>VARIAZIONE [%] V=5 [m3]</b>	
<b>Pressione Box</b>	<b>20,85</b>
<b>Pressione sbocco</b>	<b>20,85</b>
<b>Densità Box</b>	<b>15,43</b>
<b>Densità sbocco</b>	<b>15,66</b>
<b>Portata</b>	<b>18,19</b>
<b>Velocità sbocco</b>	<b>4,73</b>

Tabella 27: Variazione % grandezze volume di 5 m3

<b>VARIAZIONE [%] V=10 [m3]</b>	
<b>Pressione Box</b>	<b>11,11</b>
<b>Pressione sbocco</b>	<b>11,11</b>
<b>Densità Box</b>	<b>8,09</b>
<b>Densità sbocco</b>	<b>8,22</b>
<b>Portata</b>	<b>9,62</b>
<b>Velocità sbocco</b>	<b>2,37</b>

Tabella 28: Variazione % grandezze volume di 10 m3

Si nota subito dai valori che, come ci si aspettava, la variazione percentuale delle grandezze considerate è molto più contenuta nel caso del volume doppio con una variazione massima dell'11% nel caso delle pressioni.

Sarebbe dunque preferibile utilizzare un volume di 10 [m<sup>3</sup>], ad esempio frazionando quest'ultimo in cinque box più piccoli, ognuno con una capacità di 2 [m<sup>3</sup>] ma come detto ad oggi non conoscendo quale sarà il locale effettivo che ospiterà il laboratorio, non si può prendere una decisione finale, che sarà invece affidata alla fase esecutiva del progetto.

Di seguito per completezza sono mostrati i risultati grafici dell'analisi, rispettivamente in Figura 57 si può apprezzare l'andamento della portata di rilascio per entrambi i volumi considerati.

Mentre in Figura 58 è mostrato l'andamento della velocità in campo aperto. In questo caso particolare si vede come il volume del box influenzi veramente poco, l'evolversi di tale

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

grandezza, in quanto le curve sono quasi sovrapponibili ed inoltre tale velocità ha un comportamento quasi costante durante tutta la fase di rilascio.

Non sono stati mostrati i grafici di tutte le altre grandezze considerate nelle due tabelle precedenti, in quanto presentano esattamente gli stessi andamenti mostrati nel grafico delle portate.

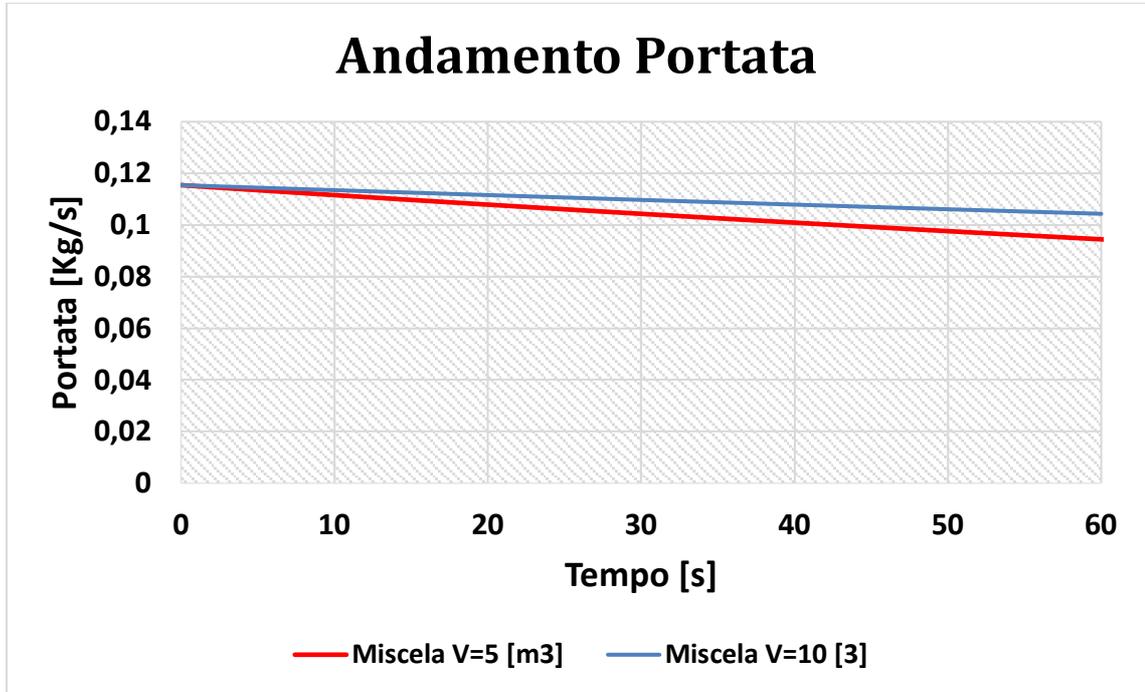


Figura 57: Andamento portata per volumi box differenti

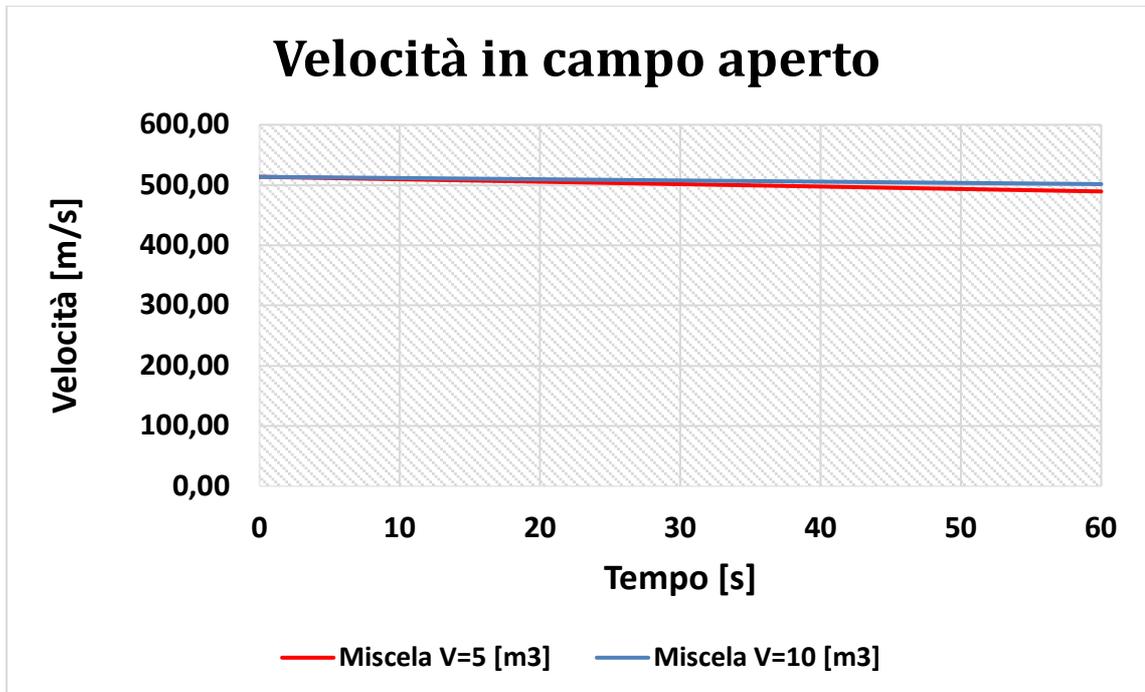


Figura 58: Andamento velocità per volumi box differenti

### 3.7.3 Cadute di pressione

In questo sotto paragrafo saranno analizzate le perdite di carico nel tratto di impianto che va dal box intermedio fino all'ugello, e di conseguenza sarà valutato un possibile diametro della tubazione che porta appunto il gas da tale serbatoio fino alla sezione dell'ugello.

Verrà dunque in prima battuta fornita una breve trattazione sulle cadute di pressione e su come sono calcolate. In seguito sarà esposto il procedimento che ha portato alla definizione di tali perdite nel nostro caso.

Le perdite di pressione sono appunto delle perdite causate dalle resistenze che si oppongono al moto di un fluido in un condotto. Queste si dividono in:

- **Perdite distribuite:** Esse sono le perdite di carico che il fluido, in moto attraverso un condotto, subisce a causa delle resistenze continue, ovvero a causa degli attriti interni al fluido (viscosità) e degli attriti esterni causati dalla rugosità del condotto stesso.
- **Perdite localizzate:** Esse sono invece le perdite che il fluido in moto subisce a causa di resistenze accidentali e/o irregolarità nel percorso. Esse si possono, ad esempio, manifestare in corrispondenza di riduzioni/allargamenti bruschi di sezione, curve, valvole, organi di regolazione ecc...

Analizziamo in prima battuta le perdite distribuite: queste possono essere calcolate con la seguente formulazione

$$\Delta p_{dist} = F_a \frac{1}{D_{pipe}} \rho \frac{w^2}{2} L \quad (23)$$

Dove

- $\Delta p$  sono le perdite di carico, [Pa]
- $F_a$  è il fattore di attrito, adimensionale
- $D_{pipe}$  è il diametro del condotto, [m]
- $\rho$  è la densità del fluido nel condotto, [Kg/m<sup>3</sup>]
- $w$  è la velocità del fluido nel condotto, [m/s]
- $L$  è la lunghezza del condotto, [m]

In questa equazione l'unico parametro che potrebbe risultare difficile da valutare è il fattore di attrito. Esso dipende da

- Regime di moto del fluido nel condotto
- Rugosità del condotto

A sua volta il regime del fluido nel condotto può essere

- *Laminare* se le particelle del fluido si muovono in modo parallelo e regolare tra di loro
- *Turbolento* se le particelle del fluido si muovono invece in modo caotico ed irregolare
- *Transitorio* quando il moto non è né chiaramente laminare né chiaramente turbolento

Il regime di moto del fluido può essere chiaramente determinato attraverso il numero di Reynolds

$$Re = \frac{wD}{\nu}$$

Dove  $\nu$  è la viscosità cinematica del fluido in [m<sup>2</sup>/s].

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci  
accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

In relazione a tale numero il moto può ritenersi

- *Laminare* se  $Re < 2000$
- *Transitorio* se  $2000 < Re < 2500$
- *Turbolento* se  $Re > 2500$

Per quanto riguarda le perdite di carico, il regime transitorio il cui campo di validità è limitato e affetto da incertezza, viene spesso assimilato al moto turbolento. [37]

In regime laminare (regime di Poiseuille) il fattore di attrito  $F_a$  è determinabile con la seguente formulazione

$$F_a = \frac{64}{Re} \quad (24)$$

Nel regime turbolento è invece determinabile con la formula di Colebrook, formula che però richiede metodi di calcoli per approssimazioni abbastanza complessi. Per questo motivo nella pratica si ricorre a formule più semplici. Ad esempio nel caso di aria si può utilizzare la seguente formulazione proposta da Altshul e modificata da Tsal [38]

$$F_a^* = 0,11 \left( \frac{\varepsilon}{D_{pipe}} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} \quad (25)$$

$$se F_a^* \geq 0,018 \rightarrow F_a = F_a^*$$

$$se F_a^* < 0,018 \rightarrow F_a = 0,85 \cdot F_a^* + 0,0028$$

Dove  $\varepsilon$  è la rugosità del condotto espressa in [mm].

Nel nostro caso abbiamo a che fare con una miscela al 2,5% in volume di metano e al 97,5% in volume di aria, quindi verosimilmente possiamo assimilarla ad aria ed utilizzare l'equazione (25).

Per quanto riguarda le perdite concentrate, esse possono essere calcolate secondo due diversi approcci:

- Metodo diretto: vengono utilizzati dei coefficienti di attrito che dipendono dalla forma e dimensione delle resistenze considerate;
- Metodo indiretto: Vengono utilizzate delle lunghezze equivalenti, che sostituiscono le resistenze accidentali con un tratto di tubo lineare in grado di dare le stesse perdite di carico.

In genere si ricorre al metodo diretto, in quanto risulta accurato e facile da utilizzare. Con questo metodo le perdite localizzate sono calcolate con la seguente equazione

$$\Delta p_{loc} = \xi \rho \frac{w^2}{2} \quad (26)$$

Dove  $\xi$  è il coefficiente di perdita localizzata, adimensionale.

Esso risulta dipendere dalla forma della resistenza localizzata ed è, con buona approssimazione, indipendente da altri fattori. Il suo valore può essere ricavato sia con formule (soprattutto in caso di geometrie semplici), sia sperimentalmente. Esistono infatti in letteratura vari cataloghi che raccolgono per tipo e caratteristiche di resistenza localizzata i vari valori del parametro  $\xi$ .

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Si vuole a questo punto calcolare mediante le due equazioni (23) e (26) le cadute di pressione all'interno del condotto. Guardando le due formulazioni però è evidente come nel nostro caso siano incognite la velocità del fluido all'interno del condotto come anche la densità.

Si consideri infatti il seguente disegno in Figura 59 che rappresenta la sezione finale dell'impianto di distribuzione, quella su cui si vogliono calcolare le cadute di pressione.

Essa risulta divisibile in 4 livelli:

- Livello 1: Condizioni del gas dentro il serbatoio
- Livello 2: Condizioni del gas nella sezione di sbocco dell'ugello
- Livello 2': Condizioni del gas all'interno del condotto
- Livello 3: Condizioni del gas in campo aperto

Le uniche condizioni non note sono quelle corrispondenti al livello 2', ovvero le condizioni del gas all'interno del condotto. Mentre risultano note tutte le altre condizioni, in particolare quelle corrispondenti al livello 2, che non sono altro che i risultati della simulazione del rilascio calcolati nel paragrafo 3.5.

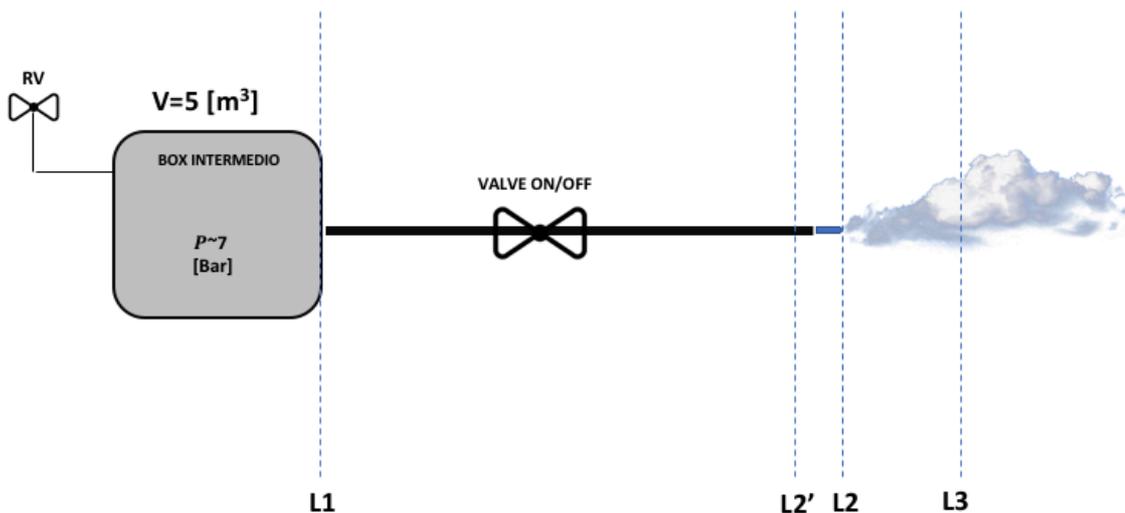


Figura 59: Sezione finale dell'impianto di distribuzione

Si consideri dunque l'equazione di conservazione della massa scritta a cavallo dell'ugello, ovvero tra la sezione L2 e la sezione L2'. Essa risulta essere

$$\rho_{2'} A_{2'} w_{2'} = \rho_2 A_2 w_2 \quad (27)$$

Si supponga ora un diametro del condotto che sia cinque volte più grande di quello dell'ugello, quindi

$$D_{2'} = 5 \cdot D_2 = 5 \cdot D_{ugello} = 5 \cdot 9,5 = 47,5 \text{ [mm]}$$

E dunque la sezione del condotto sarà pari a

$$A_{2'} = \pi \frac{D_{2'}^2}{4} = 1,77E^{-03} \text{ [m}^2\text{]}$$

Nell'equazione (27) a questo punto rimangono due incognite, ovvero  $\rho_{2'}$  e  $w_{2'}$ . Per valutarle si vuole sfruttare la caduta di pressione concentrata all'ugello. Infatti

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

$$p_{2'} = p_2 + \Delta p_{loc,ugello} \quad (28)$$

Dove quest'ultimo riprendendo la (26)

$$\Delta p_{loc,ugello} = \xi \rho_{2'} \frac{w_{2'}^2}{2} \quad (29)$$

Avendo introdotto la (29) ho un sistema con 3 equazioni, rispettivamente la (27), la (28) e la (29) e le seguenti incognite ovvero  $w_{2'}$ ,  $\rho_{2'}$ ,  $\Delta p_{loc,ugello}$  e  $p_{2'}$ ,  $\xi$ . Introduco una quarta equazione, ovvero l'equazione di stato dei gas perfetti da cui

$$\rho_{2'} = \frac{p_{2'}}{R^*_{miscela} T_{2'}} \quad (30)$$

In questo modo si è introdotta una ennesima incognita la  $T_{2'}$ .

A questo punto avendo ipotizzato il diametro del condotto cinque volte più grande di quello dell'ugello, mi permette di conoscere il fattore  $\xi$ , esso infatti da tabelle

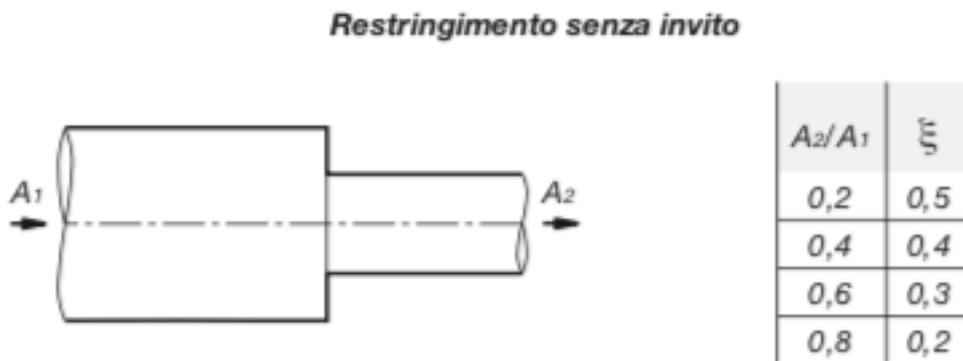


Figura 60: Valori del parametro  $\xi$  per brusco restringimento [38]

Che dunque per un restringimento della sezione pari a 5, risulta essere

$$\xi = 0,5$$

E supponendo inoltre che

$$T_{2'} = T_2$$

Ovvero che la temperatura prima dello sbocco dell'ugello sia uguale alla temperatura della miscela nella sezione di sbocco, trascurando dunque gli attriti interni.

Le uniche incognite rimangono le seguenti  $w_{2'}$ ,  $\rho_{2'}$ ,  $\Delta p_{loc,ugello}$  e  $p_{2'}$ , quindi adesso ho quattro equazioni in quattro incognite, ma alcune equazioni, in particolare la (27) e la (29) sono ridondanti. Dunque per risolvere il sistema implemento un metodo iterativo che seguirà i seguenti step:

1. Ipotizzo dei valori di tentativo per  $w_{2'}$  e  $\rho_{2'}$
2. Calcolo  $\Delta p_{loc,ugello}$  con l'equazione (29)
3. Calcolo  $p_{2'}$  con l'equazione (28)
4. Calcolo a questo punto la densità  $\rho_{2'}$  con l'equazione di stato dei gas perfetti (30)
5. Con il valore di  $\rho_{2'}$  trovato calcolo la velocità  $w_{2'}$  tramite la legge di conservazione della massa (27)

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

6. Infine valuto i due errori su  $\rho_{2'}$  e  $w_{2'}$  ed itero il processo

Dove i due errori sono stati valutati tra due iterazione successive, come segue

$$Errore_{\rho} = |\rho_{2',t+1} - \rho_{2',t}|$$

$$Errore_w = |w_{2',t+1} - w_{2',t}|$$

Si è implementato il procedimento su MATLAB imponendo una tolleranza di  $1E^{-08}$  e si sono ottenuti rispettivamente i due valori

$$\rho_{2'} = 5,16 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]$$

$$w_{2'} = 12,65 \left[ \frac{m}{s} \right]$$

Di seguito si può vedere l'andamento dell'errore durante le varie iterazioni

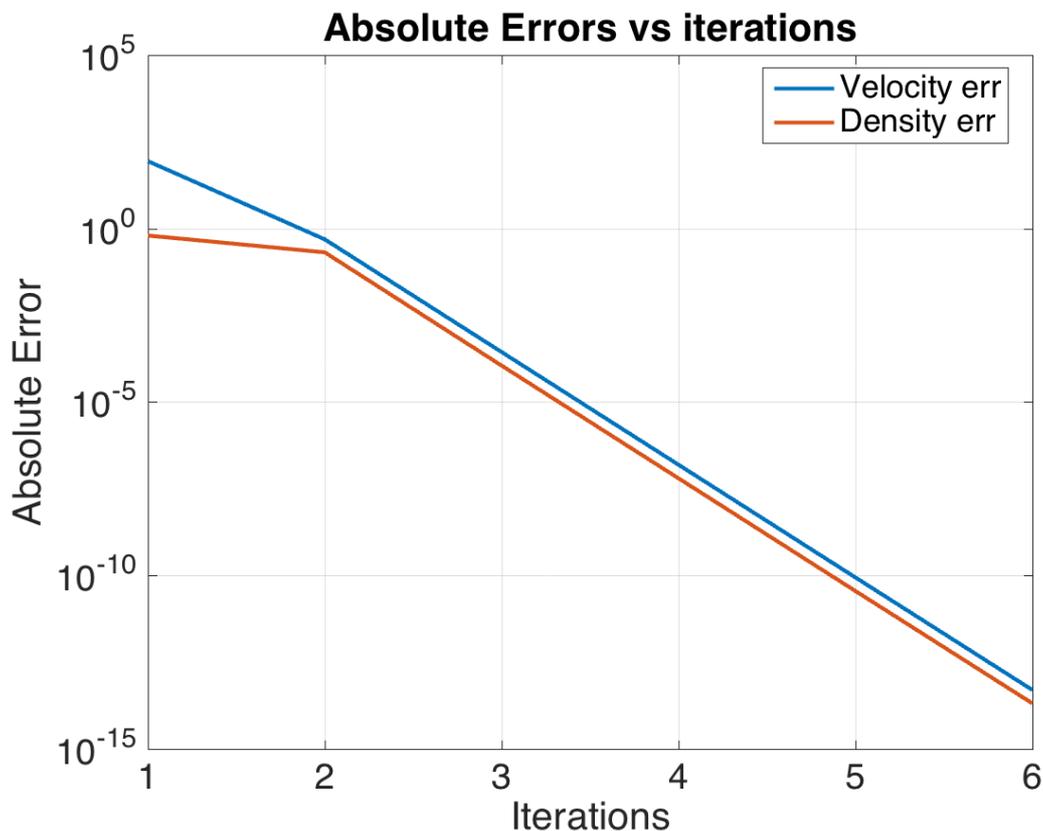


Figura 61: Andamento degli errori nel metodo iterativo

A questo punto, essendo nota la velocità del fluido all'interno del condotto, risulta facile calcolare le perdite distribuite e le altre perdite localizzate lungo il condotto.

**Perdite distribuite:**

Si è visto che per calcolare le perdite distribuite è in prima battuta necessario valutare il fattore di attrito  $F_a$ , e dunque è necessario conoscere il campo di moto del fluido all'interno del condotto, attraverso il numero di Reynolds:

$$Re = \frac{w_{2'} D_{2'}}{v_{2'}}$$

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci  
accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Dove la viscosità cinematica è stata valutata con la seguente relazione empirica [38] che è utilizzabile per l'aria, ma essendo la nostra miscela per la quasi totalità composta di aria, si è ritenuta accettabile l'approssimazione:

$$\nu = \frac{1,53}{\rho_{2'}} \cdot 10^{-06} \cdot \frac{(273 + T_{2'})^{1,5}}{413 + T_{2'}} \left[ \frac{m^2}{s} \right]$$

Dove T è espressa in [°C].

Sostituendo tutti i valori, che a questo punto sono tutti noti si ottiene

$$\nu = 2,99E^{-06} \left[ \frac{m^2}{s} \right]$$

E dunque un numero di Reynolds

$$Re = 2,01E^{+05} [-]$$

Dunque ci troviamo in un regime decisamente turbolento e per questo motivo possiamo utilizzare l'equazione (25) per il calcolo del fattore di attrito.

$$F_a^* = 0,11 \left( \frac{\varepsilon}{D_{2'}} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}$$

Per la determinazione della rugosità  $\varepsilon$  ci si è riferiti alla seguente tabella

<b>Materiale</b>	<b>Classe di rugosità</b>	<b><math>\varepsilon</math> [mm]</b>
Canale in PVC Canale in lamiera d'alluminio	molto liscio	0,03
Canale in lamiera zincata Canale in acciaio inox	liscio	0,09
Canale con rivestimento interno in polietilene Canale con rivestimento interno in fibra di vetro Condotto in cemento lisciato	rugoso	0,90
Tubo flessibile metallico Tubo flessibile non metallico Condotto in cemento non lisciato	molto rugoso	3,00

Tabella 29: Valori di rugosità per diversi tipi di condotti [38]

Si è in particolare optato per un tubo flessibile metallico, con classe di rugosità molto rugosa per cui

$$\varepsilon = 3 [mm]$$

Con tale valore si ottiene un fattore di attrito pari a

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

$$F_a^* = F_a = 0,055$$

Supponendo che si abbia una tubazione lunga

$$L = 4 [m]$$

Ed utilizzando l'equazione (23), si ottengono le seguenti perdite distribuite

$$\Delta p_{dist} = 0,019 [Bar]$$

**Perdite localizzate:**

Per quanto riguarda la perdita nella sezione dell'ugello, essa risulta pari a:

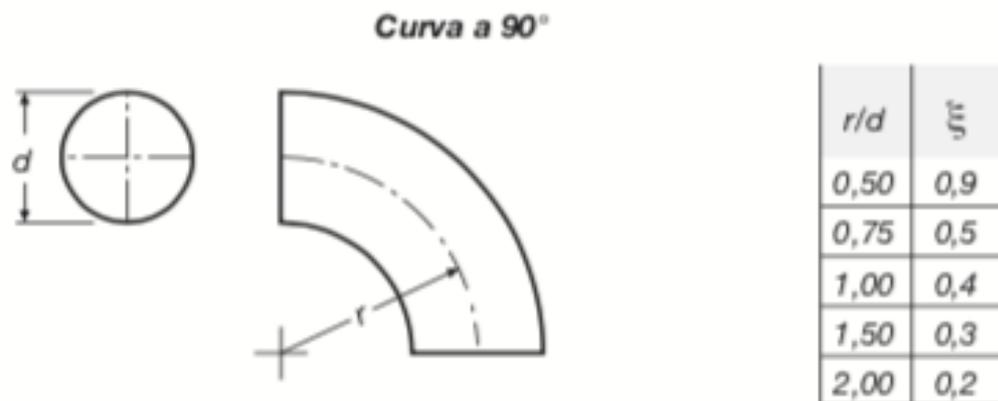
$$\Delta p_{loc,ugello} = 0,002 [Bar]$$

Ed è stata calcolata considerando un restringimento della sezione del condotto pari a 5.

Sono inoltre stati considerati altri due tipi di perdite localizzate:

- Perdite localizzate dovute a curvature della tubazione
- Perdite localizzate dovute alla presenza della valvola ON/OFF

In particolare, per i coefficienti di attrito  $\xi$  si sono considerate le seguenti tabelle



*Figura 62: Valori del parametro  $\xi$  per curve a 90°[38]*

In particolare si è scelto il coefficiente  $\xi$  per un valore di  $r/d=0,50$  quindi pari a

$$\xi = 0,9$$

E si sono considerate 4 curve a 90°, per cui le perdite localizzate risultano essere

$$\Delta p_{loc,curve} = 4 \cdot \Delta p_{loc,curva} = 0,015[Bar]$$

Per quanto riguarda la perdita dovuta alla valvola invece

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Diametro esterno tubi acciaio		3/8"-1/2"	3/4"-1"	1 1/4"-2"	>2"
Tipo di resistenza localizzata	Simbolo				
Valvola di intercettazione dritta		10,0	8,0	7,0	6,0
Valvola di intercettazione inclinata		5,0	4,0	3,0	3,0
Saracinesca a passaggio ridotto		1,2	1,0	0,8	0,6
Saracinesca a passaggio totale		0,2	0,2	0,1	0,1
Valvola a sfera a passaggio ridotto		1,6	1,0	0,8	0,6
Valvola a sfera a passaggio totale		0,2	0,2	0,1	0,1
Valvola a farfalla		3,5	2,0	1,5	1,0
Valvola a ritegno		3,0	2,0	1,0	1,0

Figura 63: Valori del parametro  $\xi$  per valvole [39]

E si è considerata una valvola a sfera a passaggio totale per tubi compresi tra 1"-2" che è il range in cui è compreso il diametro scelto, per cui

$$\xi = 0,1$$

Considerando un'unica valvola di questo tipo, il valore della perdita di carico risulta essere:

$$\Delta p_{loc, valvola} = 0,0004[Bar]$$

Noti a questo punto i valori di tutte le perdite di carico localizzate e distribuite, il valore delle perdite totali per la configurazione scelta risulta il seguente

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_{distr} + \Delta p_{loc} = 0,019 + 0,017 = 0,036 [Bar]$$

Un valore così basso di perdite di carico rispetto alla pressione che si avrebbe al livello 2, ci conferma che la scelta di un diametro della tubazione pari a 5 volte il diametro dell'ugello risulta più che accettabile.

### 3.8 Descrizione generale delle prove

In questo paragrafo saranno descritte in maniera generale la modalità delle prove di rilascio che saranno condotte per validare le simulazioni.

#### 3.8.1 Riempimento iniziale del box intermedio

Innanzitutto si è visto che il rilascio non sarà effettuato direttamente dalle bombole ma dal volume del box intermedio, quindi un primo passo dovrà essere quello di riempire tale volume.

Al momento il volume del box intermedio scelto è quello da 5 m<sup>3</sup>, nel quale dovrà esserci una pressione iniziale operativa di 7 bar. Per far sì che all'interno di tale box il gas si stabilizzi a questa pressione, è necessario che la massa contenuta al suo interno sia di 41 [Kg].

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

In tabella 3.16 è stato precedentemente mostrato che il taglio della bombola di miscela scelta contiene 11,64 [Kg] di miscela e si è anche detto che la bombola non può essere completamente scaricata ma deve essere lasciata a circa il 10% della sua capienza. Questo implica che quando la bombola arriva ad una pressione di circa 20 [Bar] quindi con una massa contenuta di miscela pari a 1,17 [Kg] non è più utilizzabile, il che significa che per ogni bombola di miscela la quantità di gas che è possibile utilizzare è pari a

$$Massa_{utile} = 11,64 - 1,17 = 10,47 [Kg]$$

Il che significa che per effettuare un riempimento iniziale del box polmone saranno necessarie:

$$Num. Bombole_{1st\_refill} = \frac{41}{10,47} = 3,89 \approx 4 \text{ bombole}$$

Finita questa prima fase di refill iniziale sarà necessario aspettare un po' di tempo affinché il gas torni a temperatura ambiente, infatti in questa fase di espansione dai 200 [Bar] della bombola fino ai 7 [Bar] del box subirà un brusco abbassamento di temperatura dovuto proprio all'espansione.

In questa fase dunque si dovrà prevedere uno strumento di controllo della temperatura all'interno del box, e nel momento in cui quest'ultimo sarà in equilibrio con l'ambiente esterno si potrà effettivamente iniziare con le prove.

### 3.8.2 Prove sperimentali

Una volta che il gas all'interno del box ha raggiunto la temperatura ambiente si potranno settare tutte le condizioni al contorno per la prima prova.

#### Step 1

Innanzitutto si dovrà scegliere la configurazione degli ingombri sul deck scelto per studiare il rilascio (si ricordi che gli oggetti contenuti nella piattaforma saranno mobili).

#### Step 2

Dovrà a questo punto essere individuato il punto di rilascio quindi si dovrà sistemare il condotto che termina con l'ugello, in prossimità dell'ostacolo che sarà scelto come fonte di rilascio.

#### Step 3

Si dovranno scegliere le posizioni ottimali dei sensori da distribuire in piattaforma in base all'output che si otterrà con il modello sviluppato ad adempiere a questo compito e che dovrà essere validato mediante gli esperimenti.

#### Step 4

Un altro importante passo è quello di scegliere le condizioni ambientali al contorno e dunque in particolare si dovrà fissare la direzione del vento ruotando la piattaforma fino alla posizione desiderata e si dovrà settare l'intensità del vento. Quest'ultima, come è stato illustrato nel capitolo 2, avrà dei valori variabili tra i 5 i 6 e i 7 [m/s] a seconda della portata che sarà richiesta ai ventilatori.

Una volta effettuati questi step preparatori, si potrà procedere con il rilascio vero e proprio. La camera di prova in cui è contenuto il mock-up dovrà essere sgombrata da eventuale personale,

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

e direttamente da sala controllo si agirà sulla valvola ON/OFF per far partire il rilascio, che come già anticipato durerà 60 secondi.

Una volta finita la prima prova e registrati i risultati sperimentali che saranno poi analizzati, sarà necessario ristabilire le condizioni iniziali all'interno del box.

In Tabella 22 è stato mostrato che durante un rilascio di un minuto per la miscela, vengono rilasciati un equivalente di 6,93 [Kg] di miscela, che dovranno dunque essere riversati nuovamente all'interno del box intermedio per ristabilire le condizioni iniziali.

Prima di procedere alla seconda prova sarebbe comunque sempre opportuno controllare i livelli di ossigeno all'interno della camera di prova mediante opportuna strumentazione, per evitare che si formino atmosfere sature di gas.

### 3.9 Analisi delle concentrazioni in laboratorio

In questo paragrafo sarà proposto uno studio del rilascio della miscela in laboratorio, dunque con i parametri definiti nel paragrafo 3.5, dal punto di vista delle concentrazioni del metano che si avranno all'interno del mock-up. L'obiettivo di questa analisi è quello di capire che concentrazioni di metano saremo in grado di rilevare all'interno dei deck del modello della piattaforma. Questa analisi risulta dunque fondamentale innanzitutto per capire su che tipo di sensori ci si deve orientare per rilevare tali concentrazioni, ed anche per capire se le dimensioni del mock-up che sono state scelte risultano effettivamente buone anche da un punto di vista di concentrazione del gas rilevabile.

#### 3.9.1 PHAST

Per l'analisi delle concentrazioni di metano, associate alle condizioni di rilascio della miscela ipotizzate, è stato utilizzato il programma di simulazione PHAST (Process Hazard Analysis Software Tool) sviluppato e distribuito da DNV. Il software permette di simulare l'evoluzione di una sequenza incidentale mediante l'utilizzo di modelli parametrici che consentono di stimare gli effetti derivanti da un evento incidentale. Il programma consente di analizzare nel dettaglio tutti gli step che caratterizzano una sequenza incidentale, a partire dal calcolo della portata di rilascio e della durata di svuotamento delle sezioni, fino ad arrivare allo studio di incendi, esplosioni e dispersioni di sostanze tossiche. Questo strumento consente di valutare le conseguenze per rilasci continui, istantanei, costanti oppure variabili nel tempo e causati dalla rottura di tubazioni corte o lunghe, valvole di sicurezza, serbatoi pressurizzati o meno e dischi di rottura.

La simulazione di una sequenza incidentale richiede innanzitutto la conoscenza delle caratteristiche della sostanza considerata. In PHAST ogni flusso è stato descritto in termini di composizione percentuale volumetrica; nel nostro caso dunque i principali componenti della miscela considerata sono due. La prima è il metano, presente nella miscela con una percentuale volumetrica del 2,5% ed il secondo componente è l'aria, presente invece con una percentuale volumetrica del 97,5%.

Ai fini del progetto in analisi, PHAST è stato utilizzato prima di tutto per calcolare la portata di rilascio in funzione del foro di rottura, della massa di gas contenuta nel box di supporto selezionato e delle condizioni di processo, in modo da capire se il modello che è stato utilizzato per il calcolo di tale grandezza nel paragrafo 3.7 risulti effettivamente affidabile; è possibile valutare sia la portata di rilascio iniziale al tempo  $t=0$ , che quella in funzione del tempo al variare dell'inventario di gas. Il modello fornisce inoltre come output la durata

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

complessiva del rilascio, tenendo conto che esso generalmente non avviene a portata costante, ma anche la velocità e la temperatura post espansione alla pressione atmosferica, e permette inoltre di selezionare il componente della miscela che si vuole tracciare, in questo caso dunque il metano, e la concentrazione di interesse ai fini dello studio.

Per quanto riguarda le simulazioni, sono stati impostati alcuni parametri importanti quali la lunghezza di rugosità della superficie di dispersione. In PHAST infatti non si possono modellare gli ostacoli, ma si può scegliere una rugosità di quest'ultimi e una loro conseguente densità. In questo caso si è scelta una "Regular large obstacle coverage" per far capire al programma che ci si trova in un ambiente congestionato.

Di seguito le analisi saranno proposte per le tre velocità del vento proposte, ovvero 5, 6 e 7 [m/s]. Inoltre in ogni grafico che verrà proposto saranno analizzate diverse classi di stabilità atmosferica.

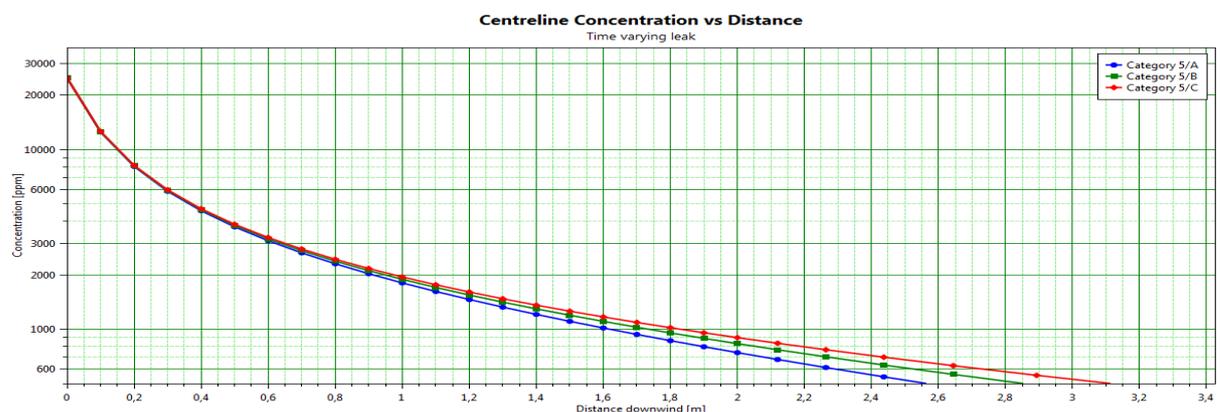
La stabilità atmosferica è un indicatore della turbolenza atmosferica e quindi della capacità di un contaminante di disperdersi nel mezzo. Questa dipende principalmente dalla velocità del vento, dalla turbolenza meccanica e convettiva.

Il criterio di classificazione di Pasquill-Gifford esprime le classi di stabilità atmosferica in funzione della velocità del vento, radiazione solare incidente e copertura nuvolosa. La scala è suddivisa in sei classi A-G.

- A: Instabilità forte
- B: Instabilità moderata
- C: Instabilità debole
- D: Neutralità
- E: Stabilità debole
- F: Stabilità moderata
- G: Stabilità forte

In questa analisi, in un'ottica di porsi nelle peggiori condizioni possibili, sono state analizzate le classi A, B, C. In seguito è stata impostata nel programma una concentrazione di metano di interesse, ed è stata fissata a 500 ppm. Questa concentrazione è stata scelta in seguito a varie prove, con l'obiettivo di capire, date le condizioni di rilascio studiate, qual è il range di concentrazione che siamo in grado di rilevare sulla pianta del mock-up.

Di seguito gli output del programma, per una velocità del vento di 5 [m/s]



## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

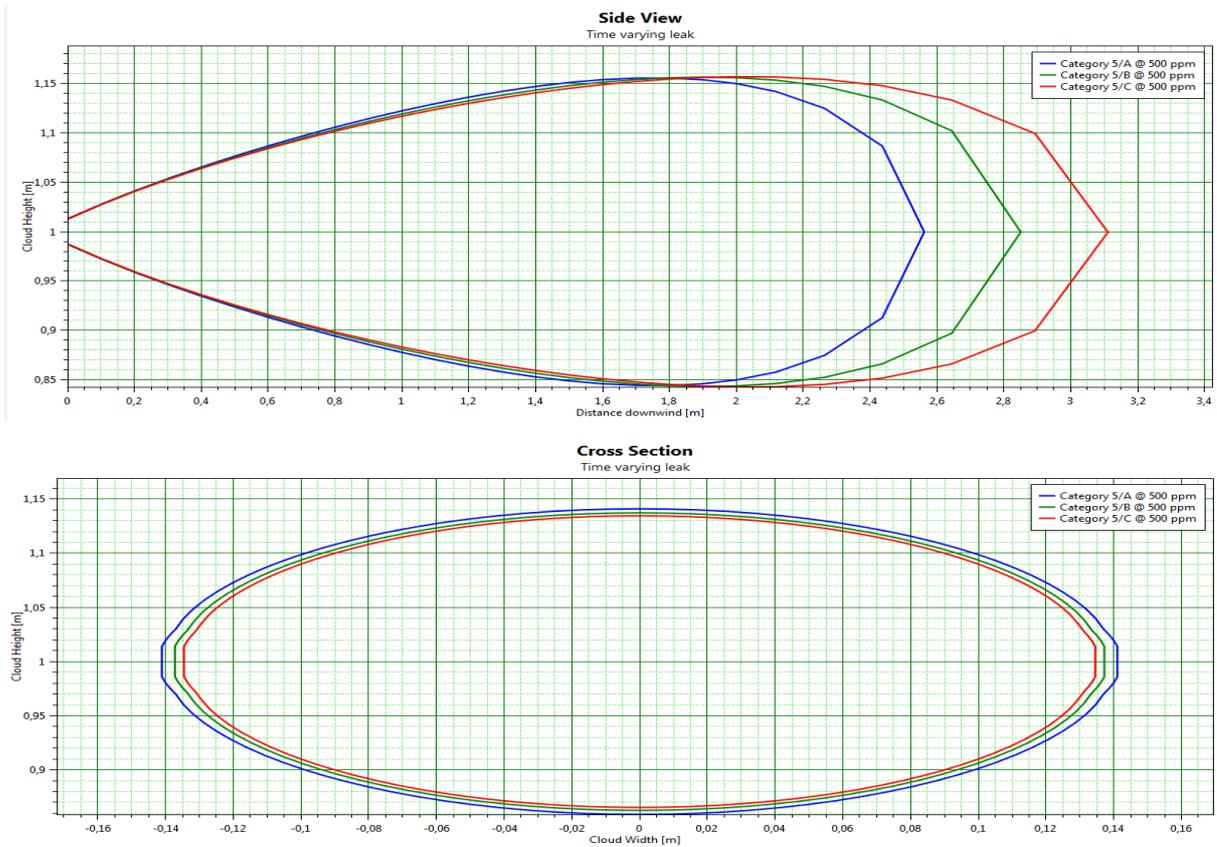


Figura 64: Dispersione del flusso di metano, con 5 m/s di vento

Il primo grafico in Figura 64 mostra l'andamento della concentrazione sull'asse della nube al variare della distanza; da esso si osserva come la concentrazione di sostanza infiammabile in atmosfera, pari al 100% in prossimità del foro di rilascio decresce all'aumentare della distanza arrivando ad una concentrazione di 500 ppm nel caso di atmosfera A, dunque nelle condizioni peggiori, a circa 2,6 [m] dalla distanza del getto. Questo significa che nel caso di velocità imposta del vento pari a 5 m/s, e considerando che la pianta del mock-up misura 3 [m] per 2 [m], saremmo in grado di misurare fino ad una concentrazione di 500 ppm su quasi tutta la pianta. Nei due grafici successivi è rappresentata l'andamento della larghezza e dell'altezza della nube alla concentrazione fissata. Si osserva come la nube di metano per quella concentrazione abbia un'altezza di 0,3 [m], che risulta dunque essere completamente comparabile con la distanza che è stata fissata tra due deck successivi, pari cioè a 0,5 [m]. Dai grafici si evidenzia inoltre come per questo flusso, la differente condizione atmosferica non influisce molto in termini di larghezza e altezza ma piuttosto in termini di distanza.

In Appendice I sono mostrati i grafici per le altre due condizioni di vento, ovvero 6 [m/s] e 7 [m/s]-

### 3.9.2 Sensoristica

In questo paragrafo saranno mostrati i due possibili sensori che potrebbero essere utilizzati per il rilevamento della concentrazione di Metano.

Il criterio alla base della scelta di un sensore piuttosto che un altro si deve basare innanzitutto sulle seguenti caratteristiche:

- Range di misurabilità

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

- Accuratezza, precisione, sensitività

Di seguito sono proposti due tipi di sensori venduti da Figaro USA, INC. che è una società americana leader nel settore della sensoristica per il tracciamento di gas.

In particolare le due possibili soluzioni individuate sono

### Sensore TGS 6810-D00

Questo tipo di sensore è un sensore catalitico per il rilevamento di metano ed altri tipi di gas. E' stato sviluppato tra l'altro anche per l'utilizzo in applicazioni residenziali. Tra le principali caratteristiche esso presenta

- Output lineare
- Lunga vita operativa

Esso è in grado di rilevare concentrazioni dei gas per cui è stato progettato in un range che va dallo 0-100% dell'LFL, quindi garantirebbe un ampio range di funzionamento.

Di seguito è mostrata la caratteristica di sensitività del sensore

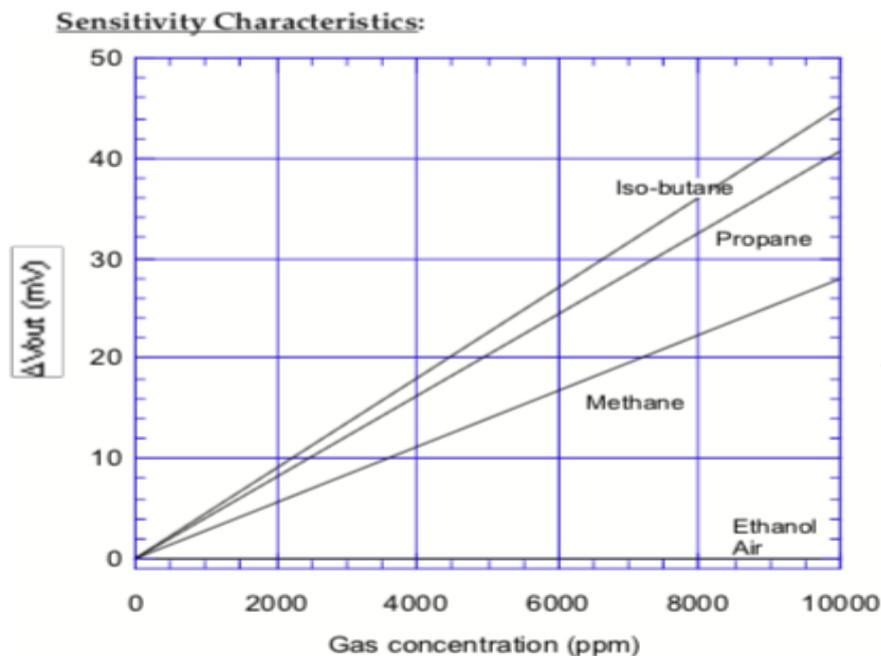


Figura 65: Caratteristica di sensitività del sensore TGS 6810-D00

Dalla caratteristica si vede che tale sensore per il metano presenta un segnale di uscita che arriva fino ad un massimo di 28 mV.

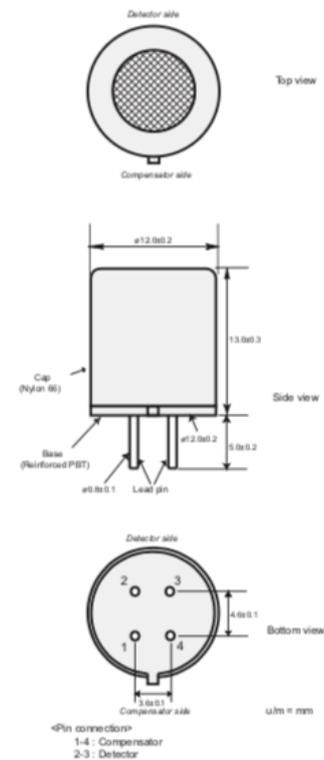
Di seguito sono invece riassunte tutte le sue caratteristiche e specifiche

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

### Specifications

Model number		TGS 6810-D00	
Sensing element type		Catalytic	
Target gases		Methane, propane, iso-butane	
Typical detection range		0~100%LEL of each gas	
Standard circuit conditions	Operating voltage	3.0±0.1V AC/DC	
Electrical characteristics under standard test conditions	Heater current	175mA (typical)	
	Heater power consumption	525mW (typical)	
	Zero offset	-15 ~ +55mV	
	Output sensitivity (ΔVout)	methane	10~18mV in 5000ppm
iso-butane		5~11mV in 1800ppm	
Standard test conditions	Test gas conditions	Methane/iso-butane in air at 20±2°C, 65±5%RH	
	Circuit conditions	3.0±0.05V AC/DC	
	Conditioning period before test	≤30 sec.	
Operating conditions		-10°C~+50°C, ≤95%RH (w/o dew condensation)	
Storage conditions		-10°C~+60°C, ≤95%RH (w/o dew condensation)	

### Structure and Dimensions:



*Figura 66: Caratteristiche e specifiche costruttive del sensore TGS 6810-D00*

### Sensore TGS 2611

Il secondo sensore proposto è il TGS 2611, anche questo modello può essere utilizzato per monitorare altri tipi di gas. E' un tipo di sensore a semiconduttori che combina in particolare un'alta sensibilità per il metano con dei bassi consumi e una lunga vita operativa e richiede una corrente operativa di soli 56 mA.

Tra le sue migliori caratteristiche dunque possiamo indicare

- Bassi consumi
- Alta sensibilità per il Metano
- Lunga vita e basso costo
- Utilizzo di circuiti semplici per il funzionamento

Esso è disponibile in due modelli, il C00 e l'E00. Il vendor indica che il primo modello è più piccolo ed ha una risposta più veloce e questo lo rende ottimo per i test/controlli sui rilasci di gas. Mentre il secondo modello è più adatto a delle applicazioni residenziali. Entrambi comunque presentano la stessa sensibilità al metano.

A differenza del precedente modello presenta però un range di misurazione più ristretto, infatti esso è in grado di lavorare in un range che va dai 500 ppm – 10000 ppm.

Di seguito la sua caratteristica di sensibilità

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

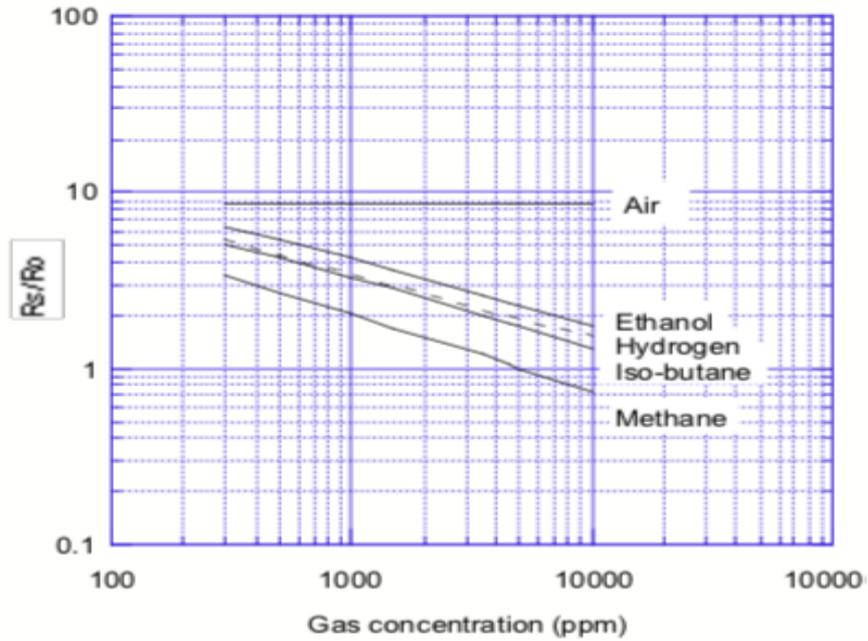


Figura 67: Caratteristica di sensitività del sensore TGS 2611-C00

Nella figura seguente sono riassunte tutte le sue caratteristiche geometriche e tecniche

**Specifications:**

Model number		TGS2611	
Sensing principle		MOS type	
Standard package		TO-5 metal can	
Target gases		Methane, Natural Gas	
Typical detection range		500 ~ 10,000ppm	
Standard circuit conditions	Heater voltage	V <sub>H</sub>	5.0±0.2V AC/DC
	Circuit voltage	V <sub>C</sub>	5.0±0.2V DC    P <sub>s</sub> ≤15mW
	Load resistance	R <sub>L</sub>	variable    0.45kΩ min.
Electrical characteristics under standard test conditions	Heater resistance	R <sub>H</sub>	approx 59Ω at room temp.
	Heater current	I <sub>H</sub>	56±5mA
	Heater power consumption	P <sub>H</sub>	280mW±25mW
	Sensor resistance	R <sub>S</sub>	0.68~6.8kΩ in 5000ppm methane
Sensitivity (change ratio of R <sub>S</sub> )			$\frac{R_S(9000ppm)}{R_S(3000ppm)}$
			0.60±0.06
Standard test conditions	Test gas conditions	Methane in air at 20±2°C, 65±5%RH	
	Circuit conditions	V <sub>C</sub> = 5.0±0.01V DC V <sub>H</sub> = 5.0±0.05V DC	
	Conditioning period before test	7 days	

**Structure and Dimensions:**

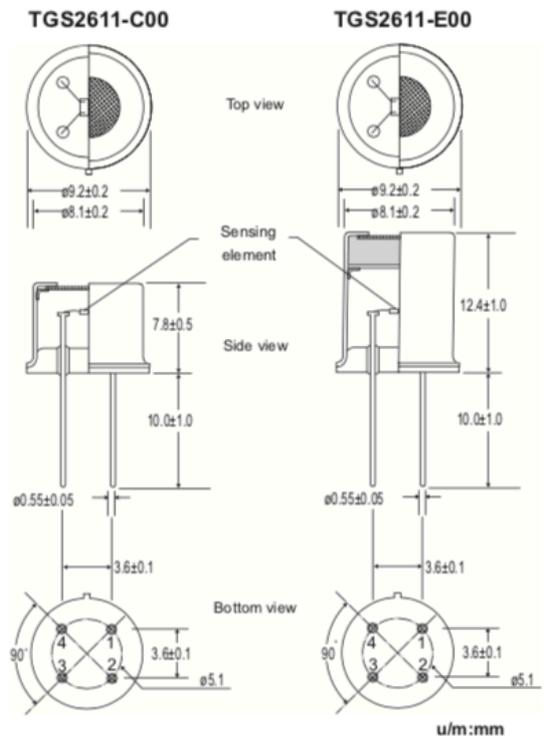


Figura 68: Caratteristiche e specifiche costruttive del sensore TGS 2611-C00

### 3.10 Linee guida per la gestione del laboratorio

In questo paragrafo saranno definiti i requisiti ed i limiti ai fini della sicurezza di un laboratorio in cui si ha anche fare con sistemi di distribuzione di gas compressi, alimentati dunque da bombole o pacchi bombole.

Va innanzitutto fatta una importante distinzione tra le diverse categorie di impianti di distribuzione. Essi si dividono in [40]

- Linee di distribuzione interna: Queste linee prelevano il gas di alimentazione prelevandolo da una bombola sorgente che può essere collocata direttamente all'interno del laboratorio dove il gas viene distribuito.
- Rete di distribuzione locale: Alimenta il gas prelevandolo da una o più bombole collocate in un deposito esterno al laboratorio. Una rete di questo tipo può servire un solo laboratorio.
- Rete dipartimentale: Distribuisce il gas dal deposito bombole dipartimentale e alimenta contemporaneamente molti laboratori. La gestione e la manutenzione sono dunque controllate direttamente dal dipartimento.

Nel nostro caso possiamo affermare di avere a che fare con una rete di distribuzione locale, in cui il gas sarà prelevato da una o più bombole collocate in un deposito esterno al laboratorio e che alimenteranno un volume intermedio, anch'esso in pressione che si troverà in una zona differente da quella in cui il gas verrà poi effettivamente distribuito.

La realizzazione e la manutenzione di una rete di distribuzione locale sono sotto la responsabilità del Responsabile di Laboratorio. L'uso è invece sotto la responsabilità del Responsabile delle attività Didattica e di ricerca, che è colui che gestisce l'attività di ricerca. Quest'ultimo soggetto è anche colui che dovrà eventualmente addestrare gli operatori, definire le procedure operative di emergenza, fornire eventuali dispositivi di protezione individuale necessari oltre alla documentazione necessaria (schede di sicurezza, manuali ecc...). Mentre il Responsabile di laboratorio è colui che dovrà valutare quanto siano adeguate le procedure, si dovrà occupare dell'addestramento degli operatori e verificare la disponibilità dei dispositivi di protezione, nonché di tutta la documentazione.

#### 3.10.1 Depositi d'uso

I depositi d'uso sono depositi contenenti bombole in uso, o nel nostro caso il già citato box polmone; non sono dunque dei depositi per scorte magazzino. Questi depositi hanno lo scopo di alimentare una rete locale di distribuzione del gas; questa soluzione è preferibile in quanto l'elemento a maggiore pressione, cioè la bombola, viene in questo modo posto in un luogo ben ventilato e lontano dagli operatori. Questi depositi non includendo depositi ad elevata capacità non sono soggetti a norme particolari.

I criteri da applicare per la realizzazione dei depositi dipendono dalla fonte di pericolo di gas presenti; tuttavia, è consigliabile realizzare i depositi cercando di garantire il più possibile l'intercambiabilità della loro destinazione d'uso in modo da rendere più flessibile e adattabile alle esigenze di ricerca il loro utilizzo. [40]

#### 3.10.2 Collocazione dei depositi d'uso

I depositi d'uso devono essere collocati in luoghi aperti quali cortili interni o terrazze.

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Essi devono inoltre essere collocati in modo da rendere non difficile il trasporto delle bombole e questo implica che il percorso del carrello non deve essere accidentato.

Inoltre, per questioni di sicurezza, l'accesso a tale deposito deve essere vietato al personale non autorizzato. Esso deve anche essere fornito di tutte le attrezzature necessarie per qualsiasi intervento di emergenza come ad esempio idranti e/o estintori.

Un altro criterio importante per scegliere la collocazione del deposito è quello di verificare l'impossibilità o la scarsa probabilità che una eventuale fuga di gas faccia in modo che quest'ultimo fluisca all'interno del laboratorio o altri ambienti chiusi; e qualora l'evento fosse considerato possibile risulterebbe necessario prevederne e valutarne le conseguenze.

### **3.10.3 Requisiti generali dei depositi d'uso**

#### Ancoraggio

I depositi d'uso devono tutti essere dotati di idonei sistemi di ancoraggio delle bombole in modo da evitare il pericolo di cadute o spostamenti non previsti.

#### Aerazione

I depositi devono garantire una buona circolazione naturale dell'aria. Le finestre di ventilazione, se necessarie, devono essere poste sia in alto sia in basso in modo da favorire la diluizione degli eventuali gas emessi indipendentemente dalla loro densità relativa rispetto all'aria.

#### Copertura e base di appoggio

La copertura del deposito deve proteggere le bombole dalla pioggia e dall'irraggiamento solare diretto. Nel caso di bombole collocate in terrazze coperte, è necessario verificare l'effettiva protezione dalla pioggia e dell'irraggiamento solare. Nel caso di depositi apposti, la copertura deve essere leggera (ad esempio, cartone catramato ondulato).

Per quanto riguarda il basamento del deposito, esso deve essere rialzato rispetto al livello del terreno e il caricamento delle bombole deve avvenire tramite una pedana di accesso.

#### Strutture metalliche

Se in metallo, la struttura del deposito deve essere saldamente ancorata al suolo e collegata ad una terra elettrica.

#### Paraschegge

La presenza di bombole in prossimità di un edificio, soprattutto se queste contengono gas infiammabili, può rendere necessaria la presenza di paraschegge. La parete del deposito può essere realizzata appositamente per svolgere questa funzione oppure in caso contrario, si può optare per la scelta di rinforzare opportunamente la parete dell'edificio.

### **3.10.4 Classificazione dei depositi d'uso**

La classificazione mostrata di seguito si basa sul pericolo derivante dal tipo di gas stoccato e sulle incompatibilità chimiche presenti tra differenti categorie di gas.

Nella tabella seguente sono elencate le diverse classi di deposito: [40]

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

<b>Deposito</b>	<b>Classe</b>	<b>Bombole stoccabili</b>
Gas inerti e aria	DA	Gas inerti e aria
Gas infiammabili	DF	Gas infiammabili (e gas inerti), sono esclusi i gas esplosivi
	DFE	Gas infiammabili esplosivi (acetilene)
Gas comburenti	DO	Gas comburenti (e gas inerti)
Gas tossici o nocivi	DT	Gas tossici o nocivi, (e gas inerti)
	DTF	Gas infiammabili tossici o nocivi, (e gas inerti)
	DTO	Gas comburenti tossici o nocivi, (e gas inerti)

Tabella 30: Elenco dei depositi/compartimenti di bombole di gas sotto pressione [40]

### 3.10.5 Responsabile del deposito e codice del deposito

Se come nel nostro caso il deposito d'uso alimenta una rete locale in un solo laboratorio, il Responsabile del Laboratorio servito è responsabile del deposito d'uso.

Ogni deposito deve essere individuato da uno specifico codice identificativo assegnato dal Referente per la sicurezza del Dipartimento. Il codice sarà costituito dal codice di classe del deposito seguito numero intero progressivo per ciascuna classe (es. DF-01, DF-02 o DFT-03). [40]

### 3.10.6 Segnaletica del deposito d'uso

All'ingresso del deposito d'uso devono essere di norma riportati: [40]

- Codice del deposito
- Capacità effettiva del deposito
- Codici locale e denominazione dei laboratori serviti
- Nome del responsabile del deposito
- Nomi dei responsabili delle attività didattiche e di ricerca che utilizzano il deposito
- I necessari segnali di avvertimento, divieto e prescrizione

Nel caso di un luogo il cui accesso sia possibile solo dal laboratorio servito (es. balconi, terrazze), non è necessario indicare il codice locale, il nome del laboratorio servito e il nome del responsabile del deposito.

Di seguito in Figura 69 un esempio di segnaletica per un deposito di gas inerti/bombole di aria in alta pressione.



Figura 69: Esempio di segnaletica per un deposito d'uso di gas inerti/bombole di aria in pressione [40]

### 3.10.7 Connessione delle bombole in uso alla linea di distribuzione

Le bombole che alimentano una linea di distribuzione di un gas compresso (bombole in uso) devono avere un dispositivo in grado di limitarne la portata. Il primo stato di depressurizzazione deve avvenire all'interno del deposito in modo da avere la linea di distribuzione a bassa pressione. La bombola deve essere connessa a un riduttore/regolatore di pressione con a valle una valvola a spillo. Questo regolatore/riduttore di pressione, infatti, oltre a eseguire una depressurizzazione, è anche in grado di limitare la portata massima di gas emessa dalla bombola.

### 3.10.8 Tubazioni

La tubazione di alimentazione proveniente da un deposito deve essere esterna all'edificio, tranne per l'ultimo tratto in cui entra nel laboratorio per connettersi al punto presa.

Le tubazioni devono avere il minimo diametro che garantisca la portata e la perdita di carico massime previste per la linea.

Quest'ultime devono garantire il contenimento del gas, devono avere uno spessore adeguato, non devono essere permeabili al gas trasportato, e non si devono avere problemi di compatibilità chimica (guarnizioni, valvole incluse).

### 3.10.9 Valvole d'intercettazione

Le valvole di intercettazione vanno posizionate: [40]

- alla partenza della tubazione principale (comunque dopo il riduttore se questo è presente);

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

- all'inizio di ogni derivazione;
- a valle di ogni riduttore di pressione;
- all'inizio di ogni interramento o passaggio in cunicoli chiusi;
- prima dell'ingresso in un qualsiasi locale o laboratorio.

Devono inoltre aver segnalata la condizione di apertura/chiusura.

### **3.10.10 Punti di presa**

Nei punti di arrivo della linea, punti presa, devono di norma essere montati una valvola di intercettazione del flusso seguita da un regolatore di pressione con valvola a spillo o altro dispositivo di regolazione e/o limitazione del flusso; tuttavia, se la pressione di distribuzione è sufficientemente bassa (3-4 bar) è sufficiente una valvola di intercettazione. Nel nostro caso vista la pressione del box intermedio scelta, che si ricorda essere di 7 bar, la pressione di efflusso sarà compresa tra i 3-4 bar, dunque ci troviamo nel secondo caso descritto.

Nei punti presa devono essere riportati degli indicatori del fluido distribuito (es. nome del gas, simbolo chimico o altra sigla/codice nota agli operatori).

### **3.10.11 Formazione degli operatori, procedure e attrezzature**

Il Responsabile delle Attività di Didattica e di Ricerca deve definire le procedure di emergenza per le bombole che utilizza e renderle disponibili al Responsabile di laboratorio e a tutti gli utilizzatori del deposito.

Deve inoltre fornire le attrezzature e i dispositivi di protezione individuali necessari per la gestione ordinaria e di emergenza delle bombole e delle linee di distribuzione del gas di sua competenza.

Si deve occupare di addestrare gli operatori che utilizzano le bombole e la linee di distribuzione del gas di sua competenza.

Tra i suoi compiti principali c'è anche quello di reperire e rendere disponibile tutta la documentazione necessaria per le bombole e la linee di distribuzione del gas di sua competenza (schede dei dati di sicurezza delle bombole, manuali dei riduttori di pressione e eventuali altre apparecchiature).

Tutti gli operatori che utilizzano e/o intervengono sull'impianto devono essere appositamente addestrati devono avere accesso a:

- le schede dei dati di sicurezza dei gas presenti nel deposito;
- le norme di sicurezza per l'esercizio del deposito;
- procedure di esercizio;
- procedure di manutenzione;
- le procedure da seguire in caso di emergenza;
- i Dispositivi di Protezione Individuale necessari (rivelatori di fuga individuali, respiratori ecc.).

### **3.11 Sistemi di sicurezza del laboratorio**

Un sistema di rilevazione di fuga è composto da sensori di gas controllati da una centralina, un allarme e un'eventuale sistema di intercettazione automatico del flusso che si attiva in caso di emergenza.

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Nel caso di linee interne o reti locali, la responsabilità della corretta realizzazione del sistema di rivelazione di fuga e della sua manutenzione è sempre del Responsabile del laboratorio.

Nel caso di un sistema di rilevazione con rilevatori di gas fissi, le centraline devono essere collocate all'esterno del laboratorio, possibilmente in prossimità dell'ingresso. L'allarme deve essere sia ottico che acustico con il segnale luminoso situato all'esterno del laboratorio, in prossimità del suo ingresso, e il segnale sonoro udibile sia all'esterno che all'interno del laboratorio. La posizione, il numero e il tipo di rilevatori di gas fissi, deve essere definito sulla base di una valutazione del rischio dovuto alle fughe di gas. Il numero dei rilevatori è determinato dall'estensione dell'area da monitorare e dalla tipologia di sensori (catalitici, elettrochimici ecc.): non è quindi possibile una valutazione a priori del loro numero senza conoscere le loro caratteristiche tecniche.

### 3.11.1 Posizione dei rilevatori di gas

Di seguito sono forniti dei criteri che fungono da indicazioni di massima per valutare se un impianto di rilevazione presenta carenze nel posizionamento dei sensori fissi.

I fattori principali da considerare per il loro posizionamento sono i seguenti: la densità relativa del gas, la presenza di correnti d'aria, la difficoltà di dispersione del gas (es. vapori di liquidi scarsamente volatili), eventuali vibrazioni che possono disturbare il sensore, i collegamenti elettrici, l'accessibilità del rilevatore per interventi di manutenzione e la protezione dall'acqua e dall'umidità.

Considerando che nel laboratorio in questione avremmo a che fare con una miscela, che una volta rilasciata nell'ambiente di prova si separerà nelle due sue componenti, dunque metano ed aria. La componente che potrebbe risultare pericolosa nel caso di accumuli all'interno della camera di prova sarebbe proprio il metano. Esso, vista la sua densità relativa rispetto all'aria, è considerato un gas leggero.

I gas leggeri (densità relativa rispetto all'aria minore di 0,8) richiedono la collocazione dei sensori in alto.

Nelle aree dove è trascurabile la presenza di flussi d'aria (velocità dell'aria stimata inferiore a 0,5 m/s), i rivelatori possono essere posizionati a distanze uniformi a circa 30 cm dal soffitto. Nel caso in cui sia presente un controsoffitto i rivelatori devono essere posizionati sia sul soffitto che sul controsoffitto; mentre in presenza di tetti inclinati, i rivelatori vanno posizionati a circa 30 cm dal punto più alto. [40]

In presenza di ventilazione (velocità dell'aria stimata superiore a 0,5 m/s), dovuta ad esempio a ventilazione artificiale o riscaldamento, si deve evitare di posizionare i rilevatori in zone morte a meno che la zona non sia a potenziale rischio di fuga di gas.

In generale è bene posizionare i rilevatori fissati sul soffitto ad una distanza di almeno un metro dalle pareti del locale, dalle finestre o altre aperture di ventilazione e da eventuali travi, e almeno mezzo metro dai pilastri.

### 3.11.2 Allarmi

Nel caso di un sistema di rivelatori fissi, l'allarme ottico-acustico deve essere posto all'ingresso del laboratorio. La centralina dei sensori fissi deve essere esterna al laboratorio e consentire l'identificazione dei rivelatori di gas da cui è stato attivato.

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

L'allarme di rilevatori portatili o individuali può essere solo acustico (di solito è ottico-acustico e, nel caso rilevatori individuali, a vibrazione), la sua d'inabilitazione non deve essere possibile oppure deve essere protetta da una password. [40]

### 3.11.3 Intercettazione del flusso in caso di allarme

Nel caso di una linea proveniente da un deposito, l'intercettazione della linea deve essere facilmente accessibile e collocata in luogo all'aperto. L'intercettazione deve essere automatica nel caso di gas infiammabili, comburenti o tossici, mentre negli altri casi può essere manuale.

In assenza di un sistema automatico di intercettazione azionato da un segnale di allarme, le procedure di emergenza devono dunque prevedere, in caso di allarme, l'intercettazione manuale della linea di distribuzione del gas.

L'intercettazione manuale di linee di distribuzione alimentate da bombole collocate nei laboratori (ancorate a parete o in armadi) deve avvenire senza pericolo per l'operatore: è quindi opportuno che il primo livello di allarme del sistema di rivelazione sia sufficientemente basso da consentire di eseguire l'operazione in sicurezza.

### 3.11.4 Procedure di emergenza

Il Responsabile dell'attività didattica e di ricerca in collaborazione con il Responsabile del Laboratorio deve definire la procedura da attuare in situazione di emergenza.

La procedura di emergenza deve prevedere le seguenti azioni:

- L'interruzione delle attività all'interno del laboratorio.
- L'intercettazione del flusso di ogni gas distribuito (linee interne, rete di distribuzione locale). Nel caso di reti locali, l'intercettazione del flusso deve essere eseguita, se possibile, anche agendo sulle valvole esterne al laboratorio.
- L'interruzione della rete di alimentazione elettrica.
- L'apertura delle finestre.
- L'evacuazione del laboratorio.
- Divieto di accesso nel laboratorio.
- L'identificazione sulla centralina di controllo del rivelatore di gas che ha causato l'allarme.

Gli interventi da eseguire in funzione del pericolo identificato, ad esempio: [40]

- 1) Nel caso di sotto-ossigenazione (%O<sub>2</sub> tra il 18 e 19,5%) si può entrare nel laboratorio per aprire eventuali finestre rimaste chiuse o ripristinare l'alimentazione elettrica e avviare le cappe.
- 2) Nel caso di atmosfera asfissiante (%O<sub>2</sub> inferiore al 18%), solo eventuali squadre di emergenza dotate di autorespiratori e appositamente addestrate possono accedere al locale. Il resto del personale non può entrare nel locale fino alla risalita del valore di ossigeno.
- 3) Nel caso di fuga di infiammabili senza l'attivazione dell'intercettazione dei flussi (primo livello di allarme). Personale addestrato può verificare all'ingresso del locale l'effettiva concentrazione del gas con un rilevatore portatile conforme alla normativa europea sulle atmosfere esplosive (ATEX), e se questa non risulta pericolosa, può entrare nel locale con il rivelatore (continuando quindi a monitorare il gas) per gli interventi necessari. Ad esempio, se le finestre sono rimaste chiuse, aprirle per ventilare il locale. Il resto del personale non può entrare nel locale fino a raggiungimento di valori di concentrazione del componente monitorato inferiori al livello d'allarme.

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

- 4) Nel caso di fuga di infiammabili con intercettazione dei flussi (secondo livello di allarme) l'ingresso nel locale può essere fonte di innesco di un'atmosfera esplosiva; nessuno può entrare nel locale fino al raggiungimento di valori di concentrazione del componente monitorato inferiori al livello d'allarme.
- 5) Nel caso di superamento del TLV-TWA, senza l'attivazione dell'intercettazione dei flussi, personale addestrato può verificare all'ingresso del locale l'effettiva concentrazione con un rivelatore portatile, e se questa non presenta problemi di tossicità acuta, può entrare nel locale con il rivelatore ed eventualmente un respiratore, ed eseguire rapidamente gli interventi necessari. Ad esempio, se le finestre sono chiuse, aprirle per ventilare il locale. Il resto del personale non può accedere al locale fino a raggiungimento di valori di concentrazione del componente monitorato inferiori al livello d'allarme.

### 3.11.5 Segnaletica all'ingresso del laboratorio

All'ingresso del laboratorio d'uso devono essere di norma affissi i seguenti elementi: [40]

- I segnali di pericolo di gas presenti in bombole all'interno del laboratorio; i cartelli devono indicare anche la collocazione delle bombole (ancorate a una parete o in un armadio).
- I segnali di pericolo dei gas distribuiti come rete locale.
- I segnali di pericolo dei gas distribuiti tramite rete gas dipartimentale.
- I necessari segnali divieto e prescrizione dovuti alla presenza dei gas (es. divieto di fiamme libere per gas infiammabili; indossare rivelatori di gas individuale per gas molto tossici).
- L'indicazione dei rilevatori di gas della rete gas dipartimentale e i relativi codici.
- L'Indicazione dei rilevatori di gas fissi installati in aggiunta a quelli dovuti alla rete dipartimentale, i relativi codici per abbinarli al canale della corrispondente centralina e la sorgente del gas (bombola ancorata a parete, codice dell'armadio o del deposito con la bombola di alimentazione).
- L'indicazione dei rilevatori di gas portatili che devono essere obbligatoriamente presenti nel laboratorio.
- L'elenco dei depositi esterni con indicazione della loro collocazione.

Un esempio di segnaletica potrebbe essere il seguente

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

Laboratorio Attività Varie			
SISTEMI DI RILEVAZIONE GAS (codice locale: S4AE31)			
Responsabile del Laboratorio: prof. Mario Rossi			
RETE GAS DIPARTIMENTALE ( codice rete gas: 5.1)			
Responsabile del servizio dipartimentale : sig. Giuseppe Bianchi			
Gas distribuiti : H <sub>2</sub> ; O <sub>2</sub> ; N <sub>2</sub> Rivelatori H <sub>2</sub> : A1; A2 O <sub>2</sub> : A4; A5; A6			
LINEE INTERNE O RETI LOCALI			
Gas rilevato: CO <sub>2</sub>	Sorgente del gas:	Bombole a parete	Gas contenuto: CO <sub>2</sub>
Centralina: RMTc4-A	Rivelatori di gas:	01; 02;	
Gas rilevato: CO	Sorgente del gas:	G90FT-01; DFT-02	Gas contenuto: miscela campione
Centralina: RMTc4-A	Rivelatori di gas:	03; 04	
Gas rilevato: NH <sub>3</sub>	Sorgente del gas:	DFT-03	Gas contenuto: 13% NH <sub>3</sub> in N <sub>2</sub>
Centralina: RMTc4-B	Rivelatori di gas:	01; 02	
Gas rilevato: O <sub>2</sub>	Sorgente gas:	Bombole a parete	Gas contenuto: 3% H <sub>2</sub> in argon
Centralina: RMTc4-B	Rivelatori di gas:	03	
Gas rilevato: SO <sub>2</sub>	Sorgente del gas:	DT-01	Gas contenuto: miscela campione
Centralina: RMTc4-B	Rivelatori di gas:	04	
RIVELATORI DI GAS PORTATILI			
Gas rilevato: CO <sub>2</sub>	Allarme:	acustico-ottico	
COLLOCAZIONE DEPOSITI ESTERNI			
DT-01 : balcone del laboratorio			
DFT-02 : cortile interno dipartimentale su cui si affaccia il laboratorio			
DFT-03 : cortile interno dipartimentale su cui si affaccia il laboratorio			

Figura 70: Esempio di cartello informativo sui sistemi di rilevazione gas [40]

## 4 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

### 4.1 Conclusioni

L'attività di ricerca portata avanti dal SEADOG riguarda le problematiche sulla sicurezza nel settore oil&gas offshore, in particolare quanto riguarda lo sviluppo di modelli CFD per lo studio di fenomeni di rilascio e dispersione ambientale di inquinanti, in un ambiente molto congestionato come quello di una piattaforma petrolifera. Dallo sviluppo di tali modelli è nata l'esigenza di avviare una campagna sperimentale per la simulazione di tali rilasci in ambiente controllato, con l'obiettivo di confrontare i risultati di tale campagna con i risultati ottenuti dai modelli progettati. L'evidenza sperimentale permetterà in questo modo di validare o meno le soluzioni proposte ed eventualmente presentare dei nuovi validi strumenti che possano davvero competere ad armi pari con gli strumenti che ad oggi si utilizzano nell'analisi di rischio nel settore petrolifero offshore.

Il lavoro di tesi presentato nei capitoli precedenti rappresenta il secondo passo nella roadmap che porterà al progetto esecutivo di un laboratorio nel quale condurre la campagna sperimentale.

All'inizio dell'attività di progettazione del laboratorio si è in prima battuta stilata una lista di progetto che riassume tutti gli obiettivi da raggiungere ed essa è consultabile al capitolo 2 di questo elaborato. Il raggiungimento di tali obiettivi è stato suddiviso in fasi ed in particolare è stata già portata a termine una prima fase di progettazione fluidodinamica del laboratorio nel quale sarà condotta la campagna sperimentale.

In particolare gli obiettivi che ci si è proposti di raggiungere in questa seconda fase progettuale sono stati tutti pienamente raggiunti.

Nel paragrafo 3.1 del capitolo 3 si è infatti riusciti a modellare un prototipo di piattaforma in scala che si è rivelato funzionale per gli scopi prefissati, sia per quanto riguarda la rappresentazione di una classica piattaforma offshore del panorama oil&gas italiano, sia per quanto riguarda la scelta delle dimensioni, le quali permettono il ricrearsi di una situazione molto vicina a quella reale.

L'analisi degli eventuali gas da utilizzare per i futuri esperimenti in laboratorio, affrontata nel capitolo 3 si può ritenere molto soddisfacente. Infatti la scelta della miscela da utilizzare in laboratorio per gli esperimenti si è rivelata efficiente in quanto ha permesso di superare varie criticità come quella di dover trovare un gas che simulasse bene il rilascio di metano per quanto riguarda i parametri coinvolti in quest'ultimo (andamento delle portate, pressioni, densità ecc...), la necessità di mantenere un certo livello di sicurezza all'interno del laboratorio e le imprescindibili considerazioni economiche dalle quali è difficile prescindere.

Anche l'analisi delle concentrazioni trattata nel paragrafo 3.9 si è rivelata molto soddisfacente, si è infatti dimostrato che su tutta la pianta del mock-up è riscontrabile una concentrazione di gas che risulta facilmente leggibile dai sensori proposti. Quindi questo indica un buon dimensionamento del rilascio sperimentale e della relativa area di prova.

Pertanto il seguente lavoro di tesi si può considerare concluso e con esso si può dunque considerare altresì conclusa la seconda fase progettuale del laboratorio, che fungerà dunque da base di partenza e progetto preliminare per la successiva fase.

## 4.2 Sviluppi futuri

Si è già detto che l'intera progettazione del laboratorio sperimentale è stata suddivisa in tre diverse fasi progettuali, che sono riassunte nella lista di progetto esposta nel paragrafo 2.2.4 del capitolo 2. Con tale lavoro di tesi si può considerare terminata la seconda fase progettuale, dunque gli sviluppi futuri di questo lavoro consisteranno nel proseguire con la terza fase progettuale che porterà al progetto esecutivo del laboratorio.

Riprendendo quanto espresso nella lista di progetto gli eventuali punti che dovranno essere portati a termine sono i seguenti:

- Dimensionamento del sistema di ventilazione per il ricircolo di aria: questo sarà un punto importante della prossima fase progettuale, in quanto assicurare un buon ricircolo di aria all'interno della camera di prova ha una duplice finalità. Innanzitutto si eviteranno problemi di sicurezza all'interno del laboratorio, evitando il formarsi di accumuli di gas dovuti agli esperimenti precedenti; in secondo luogo assicurare che ci sia un'atmosfera libera dal gas farà in modo che i risultati delle prove successive, per quanto riguarda le concentrazioni tracciate di gas, non siano influenzati dalla presenza di gas residuo dovuto alle prove precedenti.
- Dimensionamento del sistema di acquisizione dati in sala controllo: ad oggi, non essendo ancora confermato alcuno stabile per il laboratorio, si sa ben poco sull'area che effettivamente fungerà da sala controllo per gli esperimenti e di conseguenza si sa ancora poco sui sistemi che dovranno essere implementati per raccogliere le informazioni delle prove sperimentali.
- Dimensionamento del sistema di emergenza: questo punto è strettamente connesso con il precedente e fa parte di quella che possiamo definire come progettazione della sala controllo.
- Dimensionamento del sistema di power supply: per quanto riguarda questo punto si dovrà dimensionare il sistema di alimentazione di potenza del laboratorio in particolare per quanto riguarda la sua gestione dalla sala controllo.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] P. d. Torino, «bando collaborazione MISE-DSG».
- [2] A. Tortora, “*Progettazione di un laboratorio sperimentale per lo studio della dispersione di inquinanti in piattaforme oil&gas supportata da modellazione CFD*”, Politecnico di Torino, Aprile 2018
- [3] IEA, Key World Energy Statistics 2017, Paris, 2017.
- [4] R. Mazzei, «*Sintesi delle attività di esplorazione, sviluppo e produzione dei giacimenti petroliferi*».
- [5] “*La sicurezza delle operazioni in mare nel settore idrocarburi e la nuova direttiva europea 2013/30/UE*”, Giacchetta, Macini, Mesini.
- [6] “*Fundamental behaviour of offshore platform steel decks under running pool fires*” Emanuel Ufuah, University of Manchester
- [7] “*Offshore Structures, Analysis and Design*”, Dr. S. Nallayarasu, Department of Ocean Engineering, Indian Institutes of Technology Madras, Chennai – 600036 India.
- [8] “*Sviluppo di giacimenti in mare*”, Fabio Pallavicini, Treccani, Enciclopedia degli idrocarburi, Roma, 2005, p. 609.
- [9] M. L. F. S. M. S. T. A. P. D. P. C. Cocuzza, «*Stato dell'arte e prospettive di innovazione nel monitoraggio ambientale, fire & gas per impianti offshore*».
- [10] “Cenni storici sull’esplorazione petrolifera in Italia”, P.F. Barnaba, Giugno 2011.
- [11] Report Ministero dello sviluppo economico (MISE).
- [12] M. Z. -. MISE, «Decreto Ministeriale 9 agosto 2013».
- [13] <http://unmig.mise.gov.it/unmig/internazionale/direttiva.asp> [online]
- [14] ISO 73/2002, Risk management -- Vocabulary -- Guidelines for use in standards, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2002.
- [15] Vinnem, J. E. “*Offshore Risk Assessment.*” 3rd ed. London: Springer, 2014.
- [16] Carpignano, A. Risk analysis lecture booklet, Torino 2009.
- [17] Direttiva 2013/30UE del parlamento europeo e del consiglio del 12 Giugno 2013
- [18] Corti. T “*CFD Modelling of accidental events in oil&gas environment: definition of a source box*”.
- [19] “*Catastrophic oil spill in the Gulf of Mexico in April-May 2010*”, O. Yu. Lavrova, and A. G. Kostianoy.
- [20] “*Guidance on risk assessment for offshore installation*”, HSE information Sheet, Offshore Information Sheet No.3/2006.
- [21] “*The chemical laboratory: Its design and operation. A practical guide for planners of Industrial, Medical, or Educational Facilities*”, Sigurd J. Rosenlund
- [22] CNR Istruzioni per la valutazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni, Roma Gennaio 2018
- [23] «Guida all'Eurocodice1-azioni del vento,» 1991.

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci  
accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

- [24] p. RSE s, «Atlante eolico,» [Online]. Available: <http://atlanteeolico.rse-web.it/>. [online]
- [25] <<windfinder >> [Online] Available: <http://atlanteeolico.rse-web.it/>. [online]
- [26] Wikipedia “*Gallerie del vento*” [https://it.wikipedia.org/wiki/Galleria\\_del\\_vento](https://it.wikipedia.org/wiki/Galleria_del_vento). [online]
- [27] G. Savorgnani, “*Gallerie del vento*” I.T.I.S. Udine 2009/2010.
- [28] E. Mattioli “*Aerodinamica*”
- [29] G. C. C. M. A. Di Nardo, «*Approfondimenti sul bruciatore trapped-vortex. Analisi di sensibilità e scalatura del prototipo,*» 2012.
- [30] “*An intercomparison of tracer gases used for air infiltration measurements*” – Grimsrud D.T. – Lawrence Berkeley National Laboratory 2011
- [31] “*A tracer gas leak rate measurement method for circular air circuits*”, A. Tiddens, M.Roger, H.Stadler, B. Hoffschmidt, 2015
- [32] Hess K, Leukel W., Stoeckel A., Formation of explosive clouds on overhead release and modeling and validation, *Chemie-Ing. Techn*, 45, 323, (1973)
- [33] Birch A.D., Brown D.R, Dodson M.G., Swaffield F., *The structure and concentration decay of high pressure jets of nautal gas*, *Combustion science and technology*, vol 36 pp 249-261 (1984)
- [34] Birch A.D., Hughes D.J., Swaffield F., *Velocity decay of high pressure jets*, *Combustion science and technology*, vol 52 pp 161-171 (1987)
- [35] Ganci F., Tesi di dottorato “*Modellistica lagrangiana a particelle per la simulazione di rilasci e dispersione atmosferica di idrogeno e applicazioni alla sicurezza industriale*”, Politecnico di Torino, 2009
- [36] OGP “*Risk Assesment Report 434 – Appendice I – Process Release Frequencies*”
- [37] “*Le perdite di carico nei circuiti idraulici*” Luigi Fanizzi
- [38] “*Tabelle e diagrammi-Perdite di carico aria*”-M. Doninelli, M.Doninelli
- [39] “*Le reti di distribuzione – perdite localizzate*” – *Corso di componenti ed impianti termotecnici CRB Università degli studi di Perugia*
- [40] “*Guida alla distribuzione di gas compressi*” L. Manna, Politecnico di Torino, *Dipartimento di Scienza Applicata e tecnologia*.

## LISTA FIGURE

<i>Figura 1: Consumo mondiale di energia primaria per tipo di vettore energetico [3].....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2: Profili di differenti tipi di piattaforme offshore [6].....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 3: Piattaforma fissa con struttura di supporto in acciaio [6].....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 4: Piattaforma fissa con struttura di supporto a gravità [6].....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 5: Compliant Tower [6].....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 6: Piattaforma TLP.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 7: Piattaforma SPAR [8].....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 8: Impianto FPS (Eni-Saipem) [8].....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 9: Impianto FPSO.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 10: Processo di estrazione gas in piattaforma.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 11: Giacimenti di idrocarburi e rete dei metanodotti in Italia. [10].....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 12: Carta delle concessioni di coltivazione delle piattaforme marine in alto Mar Adriatico [11].....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 13: Carta delle concessioni di coltivazione delle piattaforme marine basso Mar Adriatico e Sicilia [11].....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 14: Piattaforma Vega (Edison) [11].....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 15: Confronto di due eventi incidentali con lo stesso rischio ma diversa percezione da parte dell'opinione pubblica [16].....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 16: Steps dell'analisi di rischio [20].....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 17: Matrice di rischio [20].....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 18: Event Tree Analysis [16].....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 19: Fault Tree Analysis [16].....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 20: Criteri di accettabilità del rischio [16].....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 21: Possibili barriere nel caso di rilascio accidentale [18].....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 22: Modello di circolazione tri-cellulare [22].....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 23: Profilo di velocità media del vento in siti con diversa rugosità del terreno [23].....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 24: Spettro di Van der Hoven.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 25: Suddivisione della componente longitudinale della velocità del vento.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 26: Mappa velocità media del vento sulle coste italiane [24].....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 27: Distribuzione del vento: in alto a sinistra Ravenna Punta Marina, in alto a destra Rimini Marecchia, in basso Pineto [25].....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 28: Similitudine geometrica.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 29: Profili di velocità del flusso di aria immesso (In alto per una geometria reale, in basso per una geometria in scala 1:10) [2].....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 30: Sezione del condotto convergente di immissione dell'aria [2].....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 31: Layout finale del laboratorio con doppia parete divisoria [2].....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 32: Modello ventilatore assiale [2].....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 33: AMELIA C [11].....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 34: NAOMI PANDORA [11].....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 35: Prospetto Mock-up.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 36: Sezione di un generico ugello.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 37: Ugello convergente.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 38: Andamento della portata in un ugello convergente.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 39: Andamento della portata al variare di pressione e temperatura del gas.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 40: Ugello convergente-divergente.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 41: Andamento della portata in un ugello convergente-divergente.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 42: Efflusso super-critico.....</i>	<i>78</i>

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci  
accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

<i>Figura 43: Esempi di vari ripi di localizzazione di fori .....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 44: Andamento portata caso reale.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 45: Andamento pressione allo sbocco caso reale.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 46: Andamento pressione nel serbatoio caso reale .....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 47: Andamento densità allo sbocco caso reale .....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 48: Andamento velocità in campo aperto caso reale.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 49: Andamento portata rilascio in laboratorio .....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 50: Andamento pressione di efflusso in laboratorio.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 51: Andamento pressione all'interno del box.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 52: Andamento densità allo sbocco in laboratorio.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 53: Andamento della velocità in campo aperto in laboratorio .....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 54: Analisi dei consumi per un rilascio di 1 minuto.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 55: Costo unitario per prova effettuata.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 56: Schema dell'impianto di distribuzione gas .....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 57: Andamento portata per volumi box differenti .....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 58: Andamento velocità per volumi box differenti.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 59: Sezione finale dell'impianto di distribuzione .....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 60: Valori del parametro <math>\zeta</math> per brusco restringimento [38].....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 61: Andamento degli errori nel metodo iterativo .....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 62: Valori del parametro <math>\zeta</math> per curve a 90°[38] .....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 63: Valori del parametro <math>\zeta</math> per valvole [39] .....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 64: Dispersione del flusso di metano, con 5 m/s di vento.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 65: Caratteristica di sensitività del sensore TGS 6810-D00.....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 66: Caratteristiche e specifiche costruttive del sensore TGS 6810-D00 .....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 67: Caratteristica di sensitività del sensore TGS 2611-C00.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 68: Caratteristiche e specifiche costruttive del sensore TGS 2611-C00 .....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 69: Esempio di segnaletica per un deposito d'uso di gas inerti/bombole di aria in pressione [40].....</i>	<i>117</i>
<i>Figura 70: Esempio di cartello informativo sui sistemi di rilevazione gas [40] .....</i>	<i>122</i>

## LISTA TABELLE

<i>Tabella 1: Composizione gas naturale</i> .....	23
<i>Tabella 2: Incidenti più comuni in una piattaforma offshore [15]</i> .....	29
<i>Tabella 3: Tipologie di fuoriuscite [15]</i> .....	30
<i>Tabella 4: HAZID Output [16]</i> .....	32
<i>Tabella 5: Classificazione frequenze HAZID [16]</i> .....	32
<i>Tabella 6: Classificazione dei venti [22]</i> .....	41
<i>Tabella 7: Diverse categorie di terreno e relativi parametri [23]</i> .....	42
<i>Tabella 8: Dimensioni Laboratorio ipotizzate</i> .....	46
<i>Tabella 9: Tipologie costruttive di galleria del vento subsonica</i> .....	47
<i>Tabella 10: Range di funzionamento dei singoli ventilatori [2]</i> .....	53
<i>Tabella 11: Riepilogo dimensioni Mock-up</i> .....	58
<i>Tabella 12: Caratteristiche di alcuni gas traccianti usati in laboratorio [31]</i> .....	61
<i>Tabella 13: Riepilogo gas</i> .....	66
<i>Tabella 14: Densità gas esausti</i> .....	67
<i>Tabella 15: Modelli di rilascio</i> .....	68
<i>Tabella 16: Tipi di ugello e flussi</i> .....	72
<i>Tabella 17: Casistica ugelli convergenti-divergenti</i> .....	76
<i>Tabella 18: Frequenze di rilascio per un serbatoio in pressione [36]</i> .....	82
<i>Tabella 19: Parametri rilascio reale</i> .....	83
<i>Tabella 20: Parametri rilascio in laboratorio</i> .....	88
<i>Tabella 21: Valori dello pseudodiametro per il rilascio in laboratorio</i> .....	93
<i>Tabella 22: Massa di miscela rilasciata per singola prova</i> .....	93
<i>Tabella 23: Massa di miscela rilasciata per più prove</i> .....	93
<i>Tabella 24: Massa di neon rilasciata per singola prova</i> .....	94
<i>Tabella 25: Massa di neon rilasciata per più prove</i> .....	94
<i>Tabella 26: Preventivi bombole</i> .....	95
<i>Tabella 27: Variazione % grandezze volume di 5 m<sup>3</sup></i> .....	97
<i>Tabella 28: Variazione % grandezze volume di 10 m<sup>3</sup></i> .....	97
<i>Tabella 29: Valori di rugosità per diversi tipi di condotti [38]</i> .....	104
<i>Tabella 30: Elenco dei depositi/compartimenti di bombole di gas sotto pressione [40]</i> .....	116

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci  
accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

## APPENDICE I

In questa sezione sono mostrati I risultati dell'analisi su PHAST del rilascio in laboratorio, rispettivamente per le condizioni di vento simulate pari a 6 [m/s] e 7 [m/s].

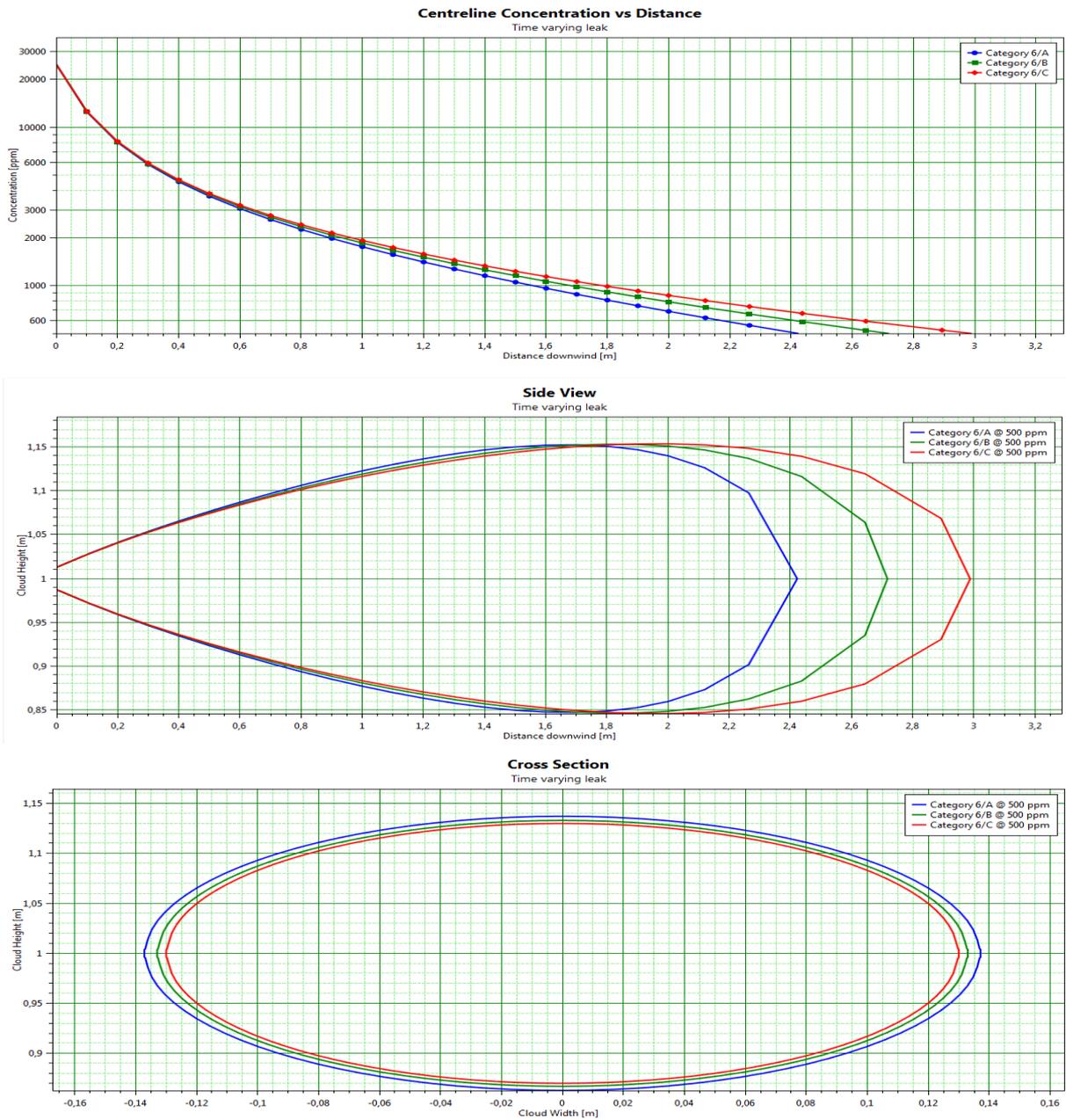
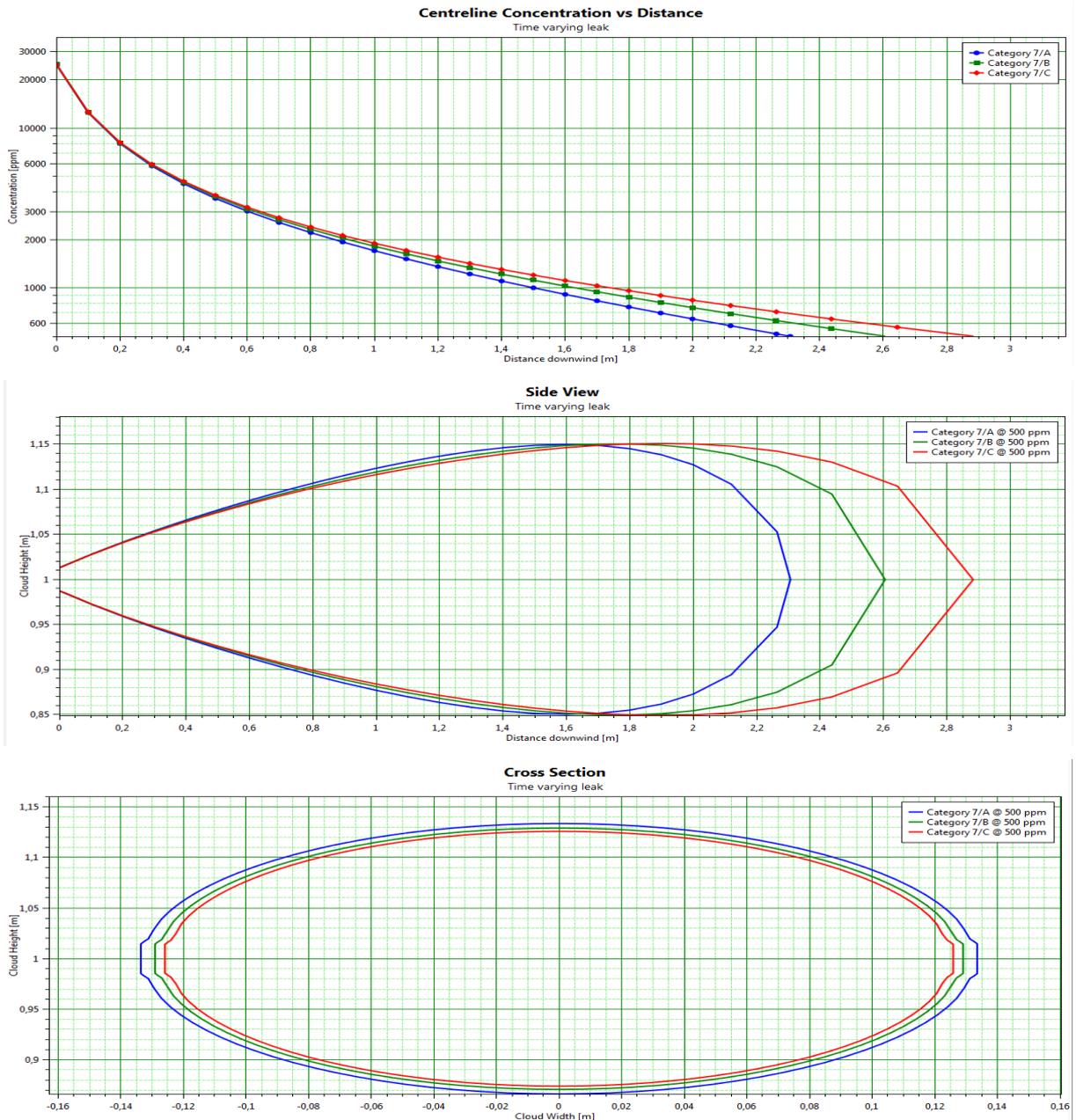


Figura A-1: Dispersione del flusso di metano, con 6 m/s di vento

## Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore



*Figura A-2: Dispersione del flusso di metano, con 6 m/s di vento*

Per entrambe le figure valgono le stesse considerazioni che sono state fatte nel paragrafo 3.9.1, con l'unica differenza che essendo l'intensità del vento maggiore rispetto al caso esposto nel paragrafo menzionato, la concentrazione d'interesse scelta sarà possibile misurarla ad una distanza che risulterà minore. Analizzando però le condizioni di stabilità atmosferica A (ricordando essere le peggiori), tale concentrazione risulta comunque misurabile ancora ad una distanza maggiore di 2 [m] dal punto di rilascio, e dunque si può ancora affermare che su la quasi totalità della pianta del deck, le cui dimensioni sono 2 [m] per 3 [m], è ancora possibile misurare tale concentrazione. Per quanto riguarda l'altezza della nube queste risultano praticamente invariate e pari a 0,3 [m] in entrambi i casi di vento analizzati. Questo significa che non solo la stabilità atmosferica ma anche la velocità del vento non modifica l'altezza della nube, ma solo la lunghezza.

Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci  
accidentali di gas in impianti oil&gas offshore

## **ALLEGATO 1 : LAYOUT MOCK-UP**