POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale

In Ingegneria Energetica e Nucleare

Tesi di Laurea Magistrale

Aspetti di sicurezza e valutazione del rischio in ambito Oil&Gas off-shore

Progettazione di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci incidentali di gas in piattaforme Oil&Gas



Relatori Prof. Andrea Carpignano Prof.ssa Raffaella Gerboni Prof. Francesco Ganci **Candidato** Alessandro Gueccia

Anno Accademico 2018/2019

ABSTRACT

The strategic importance of global oil and gas reserves led technological development to make areas difficult to explore, such as the seabed and "deep waters", easily accessible, thanks to the use of off-shore Oil & Gas extraction plants. Public opinion, however, is increasingly pressing on issues concerning the environmental and social impact of industrial plants, inducing technological development to meet safety requirements that are much more binding than in the past, in order to guarantee environmental protection, especially for the industrial plants that treat flammable and / or toxic substances, such as an off-shore extraction plant.

The present work falls within a risk analysis context regarding off-shore natural gas extraction platforms, for the development of tools to be used to analyse the consequences deriving from incidental gas release scenarios. In particular, the project underlying this master thesis is about the development of an innovative approach for the study of incidental gas releases in off-shore platforms, based on computational fluid dynamics (CFD). In order to use the CFD models developed by the research laboratory of SEADOG as tools for the study of the consequences of incidental gas releases, an experimental campaign is needed in order to validate the CFD results: the aim of this thesis work concerns, therefore, the design of an experimental laboratory where pressure gas release experiments will be performed, simulating the same operating conditions as CFD simulations and recreating the test environment with a scaled platform model (experimental mockup) located within a wind tunnel, in which recreate a uniform wind field, as the one present in the open sea.

This master thesis aims to define the functional and operational requirements of the experimental laboratory and contributing to the drafting of a project document concerning the final design of the experimental laboratory, which, once completed, will define each system or apparatus necessary to achieve the objectives set.

This paper intends to continue the preliminary design carried out in previous thesis works, laying the foundations for the final design of the wind tunnel and the experimental mockup. The fluid dynamics design of the wind tunnel was carried out by DIMEAS (Department of Mechanical and Aerospace Engineering), and it was verified by using a different software for CFD simulations "ANSYS Fluent", focusing the attention on the functional requirements of the room, such as the uniformity of the wind flow generated in a fairly large area of the test chamber and the maximum electrical power limit available from the current supply contract for the operation of the fans chosen for generating the desired wind flow.

For what concern the mockup design, the hypotheses adopted in the implementation of the innovative CFD models developed by the SEADOG and the constraints determined by the wind flow generated because of the lay-out of the wind tunnel were considered as project constraints. The objective was to design a versatile structure, therefore characterized by an easily modifiable configuration, in order to allow the re-use of the platform model in other experimental campaigns, once the validation process of the CFD models ends. CAD software such as "AutoCAD" and "SolidWorks" were used for the design of the experimental mockup.

Furthermore, the requirements of the other identified systems (such as the gas distribution system, sensors, electronics for experimental tests, data acquisition and data analysis) have been partially

analysed, although they were not the design objectives of this thesis work. In fact, the design of the experimental laboratory involves different actors, and the successful outcome of the project requires that these actors share requirements and implementation solutions, involving the other parties involved in a specific system design work. It will be the responsibility of the project manager to coordinate these actors and, once the final design is completed, to prepare the executive project, identifying the various suppliers for the subsequent construction phase.

INDICE

1.	INTR	ODUZIONE	7
1	1.1.	IL CONTESTO E GLI OBIETTIVI DEL LAVORO	7
1	1.2.	STRUTTURA DELLA TESI	10
2.	IL SE	TTORE OFF-SHORE OIL&GAS	14
2	2.1.	STRUTTURE OFF-SHORE	14
4	2.2.	PIATTAFORMA DI PRODUZIONE A STRUTTURA FISSA	15
4	2.3.	PIATTAFORMA DI PRODUZIONE A STRUTTURA GALLEGGIANTE	17
2	2.4.	PROCESSO DI ESTRAZIONE DI GAS NATURALE IN UNA PIATTAFORMA OFF-SHORE	20
2	2.5.	SISTEMI DI SICUREZZA PER IMPIANTI DI PRODUZIONE OFF-SHORE	21
2	2.6.	IL SETTORE "OFF-SHORE" IN ITALIA	23
	2.6.1.	Analisi del contesto off-shore italiano	24
3.	ANA	LISI DI RISCHIO	28
	3.1.	INTRODUZIONE ALL'ANALISI DI RISCHIO	
	3.2.	"OUANTITATIVE RISK ASSESSMENT" PER IL SETTORE OIL & GAS OFF-SHORE	
		(
	3.2.1.	Introduzione alla QRA	
	3.2.1.3.2.2.	Introduzione alla QRA Raccolta dei dati storici	
	3.2.1.3.2.2.3.2.3.	Introduzione alla QRA Raccolta dei dati storici Hazard Identification	
	 3.2.1. 3.2.2. 3.2.3. 3.2.4. 	Introduzione alla QRA Raccolta dei dati storici Hazard Identification Valutazione delle frequenze	
	 3.2.1. 3.2.2. 3.2.3. 3.2.4. 3.2.5. 	Introduzione alla QRA Raccolta dei dati storici Hazard Identification Valutazione delle frequenze Analisi delle conseguenze	
	 3.2.1. 3.2.2. 3.2.3. 3.2.4. 3.2.5. 3.2.6. 	Introduzione alla QRA Raccolta dei dati storici Hazard Identification Valutazione delle frequenze Analisi delle conseguenze Calcolo e valutazione del rischio	
4.	 3.2.1. 3.2.2. 3.2.3. 3.2.4. 3.2.5. 3.2.6. MOD 	Introduzione alla QRA Raccolta dei dati storici Hazard Identification Valutazione delle frequenze Analisi delle conseguenze Calcolo e valutazione del rischio ELLAZIONE CFD DEI RILASCI DI GAS IN PRESSIONE	
4.	 3.2.1. 3.2.2. 3.2.3. 3.2.4. 3.2.5. 3.2.6. MOD 4.1. 	Introduzione alla QRA Raccolta dei dati storici Hazard Identification Valutazione delle frequenze Analisi delle conseguenze Calcolo e valutazione del rischio ELLAZIONE CFD DEI RILASCI DI GAS IN PRESSIONE FISICA DEL FENOMENO DI RILASCIO DI GAS IN PRESSIONE	
4.	3.2.1. 3.2.2. 3.2.3. 3.2.4. 3.2.5. 3.2.6. MOD 4.1. 4.2.	Introduzione alla QRA Raccolta dei dati storici Hazard Identification Valutazione delle frequenze Analisi delle conseguenze Calcolo e valutazione del rischio ELLAZIONE CFD DEI RILASCI DI GAS IN PRESSIONE FISICA DEL FENOMENO DI RILASCIO DI GAS IN PRESSIONE RICHIAMI DEI LAVORI PRECEDENTI	
4.	3.2.1. 3.2.2. 3.2.3. 3.2.4. 3.2.5. 3.2.6. MOD 4.1. 4.2. 4.3.	Introduzione alla QRA Raccolta dei dati storici	
4.	3.2.1. 3.2.2. 3.2.3. 3.2.4. 3.2.5. 3.2.6. MOD 4.1. 4.2. 4.3. 4.4.	Introduzione alla QRA Raccolta dei dati storici Hazard Identification Valutazione delle frequenze Analisi delle conseguenze Calcolo e valutazione del rischio ELLAZIONE CFD DEI RILASCI DI GAS IN PRESSIONE FISICA DEL FENOMENO DI RILASCIO DI GAS IN PRESSIONE RICHIAMI DEI LAVORI PRECEDENTI LA PIATTAFORMA DI RIFERIMENTO IL CONCETTO DI SOURCE BOX	30 31 31 31 32 33 33 33 35 36 39 40 40 43
4.	3.2.1. 3.2.2. 3.2.3. 3.2.4. 3.2.5. 3.2.6. MOD 4.1. 4.2. 4.3. 4.4.	Introduzione alla QRA Raccolta dei dati storici Hazard Identification Valutazione delle frequenze Analisi delle conseguenze Calcolo e valutazione del rischio ELLAZIONE CFD DEI RILASCI DI GAS IN PRESSIONE FISICA DEL FENOMENO DI RILASCIO DI GAS IN PRESSIONE RICHIAMI DEI LAVORI PRECEDENTI LA PIATTAFORMA DI RIFERIMENTO IL CONCETTO DI SOURCE BOX RISULTATI E VALIDAZIONE DEL MODELLO CFD	30 31 31 31 32 33 33 35 36 39 40 40 43 47
4.	3.2.1. 3.2.2. 3.2.3. 3.2.4. 3.2.5. 3.2.6. MOD 4.1. 4.2. 4.3. 4.4. 4.5. IL LA	Introduzione alla QRA Raccolta dei dati storici Hazard Identification Valutazione delle frequenze Analisi delle conseguenze Calcolo e valutazione del rischio ELLAZIONE CFD DEI RILASCI DI GAS IN PRESSIONE FISICA DEL FENOMENO DI RILASCIO DI GAS IN PRESSIONE RICHIAMI DEI LAVORI PRECEDENTI LA PIATTAFORMA DI RIFERIMENTO IL CONCETTO DI SOURCE BOX RISULTATI E VALIDAZIONE DEL MODELLO CFD	

4	5.2.	SPAZI A DISPOSIZIONE	
4	5.3.	PROGETTAZIONE FLUIDODINAMICA DELLA GALLERIA DEL VENTO	54
	5.3.1.	Introduzione alla galleria del vento	54
	5.3.2.	Requisiti funzionali e vincoli strutturali	54
	5.3.3.	Elementi della galleria del vento	59
	5.3.	3.3.1. Condotto convergente	59
	5.3.	3.3.2. Camera di prova	60
	5.3.	3.3.3. Condotto divergente	60
	5.3.	3.3.4. Vano ventole	61
	5.3.	3.3.5. Camera di rotazione del flusso	63
	5.3.4.	Simulazione CFD del campo di moto nella galleria del vento	63
	5.3.	3.4.1. Cenni sulla fluidodinamica computazionale (CFD) e workflow	63
	5.3.	3.4.2. Simulazione fluidodinamica della galleria del vento	65
	5.3.	3.4.3. Confronto dei risultati delle simulazioni CFD	76
4	5.4.	MOCKUP SPERIMENTALE	
4	5.5.	SISTEMA DI DISTRIBUZIONE DEL GAS	
4	5.6.	SENSORISTICA, ELETTRONICA A SERVIZIO DELLE PROVE SPERIMENTALI, ACQUI	SIZIONE
		E ANALISI DATI	91
-	5.7.	CONDIZIONI DI FUNZIONAMENTO DEL LABORATORIO	
6.	PROC	GETTAZIONE DEL MOCK-UP SPERIMENTALE	96
(5.1.	IL "MOCKUP": MODELLO DI RIFERIMENTO	97
	6.1.1.	Sintesi requisiti generali	
(5.2.	PROPOSTA DI SOLUZIONE COSTRUTTIVA	
	6.2.1.	Layout deck	
	6.2.2.	Ingombri	
	6.2.3.	Pezzo speciale: Source Box	110
7.	CON	ICLUSIONI	

1. INTRODUZIONE

1.1. IL CONTESTO E GLI OBIETTIVI DEL LAVORO

I combustibili di origine fossile sono, ancora oggi, la base della produzione mondiale di energia, nonostante la crescente diversificazione di fonti energetiche alternative. Secondo il report "Global Energy & CO2 Status" dell'International Energy Agency del 2017 ([1]) la crescente domanda globale di energia (l'incremento è stato del 2,1% rispetto a una crescita dello 0,9 % dell'anno 2016 e a una crescita media dello 0,9% riferita ai precedenti 5 anni) è stata colmata per il 72% da fonti fossili, il 25% da fonti rinnovabili e la rimanente parte dal nucleare.



Figura 1: Crescita media annuale di domanda energetica divisa per fonti [1]

Gran parte delle riserve mondiali di petrolio e di gas sono presenti in zone difficilmente accessibili, all'interno di giacimenti costituiti da rocce di copertura impermeabili, in strutture geologiche che hanno impedito in passato la migrazione degli idrocarburi. La loro importanza strategica ha indotto lo sviluppo tecnologico a rendere più accessibili tali zone: il progresso delle tecnologie riguardanti gli impianti di estrazione off-shore ha consentito l'esplorazione di zone inospitali come i fondali marini e le "acque profonde". In un impianto di estrazione off-shore si cerca di ricreare le stesse condizioni operative che

si hanno sulla terraferma in un impianto di estrazione di idrocarburi, garantendo determinate condizioni di sicurezza sia per gli operatori che per l'ambiente marino.

L'incidente avvenuto nel Golfo del Messico nell'Aprile 2010, però, ha avuto un impatto ambientale e sociale non indifferente e ciò ha innescato una serie di adeguamenti normativi in materia di attività petrolifera. Nel 2013, la Commissione Europea ha adottato lo schema di proposta di regolamento del Parlamento Europeo e del Consiglio sulla sicurezza delle attività offshore, con l'obiettivo di fissare standard di sicurezza maggiori e condivisi, al fine di limitare le possibili conseguenze in caso di incidente, aumentando la protezione dell'ambiente marino. Gli Stati membri si impegnano affinché gli operatori del settore Oil&Gas off-shore redigano opportunamente le relazioni sui grandi rischi per gli impianti di produzione. L'analisi di rischio, in particolare, è lo strumento che consente una valutazione del rischio di incidente gravi, richiedendo una valutazione delle probabilità e delle conseguenze per un particolare scenario incidentale, ma anche una stima delle misure necessarie a prevenirlo e delle misure di emergenza richieste in caso di incidente grave. In Italia, la Direttiva 2013/30/UE è stata recepita con il Dec. Lgs. 18 agosto 2015, n.145 (Attuazione della direttiva 2013/30/UE sulla sicurezza delle operazioni in mare nel settore degli idrocarburi e che modifica la direttiva 2004/35/CE), la cosiddetta "Direttiva Offshore" [2].

Il contesto in cui si colloca questo lavoro di tesi è, quindi, l'analisi del rischio e delle conseguenze derivanti da scenari incidentali riguardanti le piattaforme off-shore: il processo di produzione, le sostanze trattate, le condizioni ambientali e le condizioni meteorologiche sono oggetto dell'analisi di rischio, la quale aiuta nell'identificazione dei pericoli e delle strategie di prevenzione e mitigazione di scenari incidentali. In particolare, il laboratorio di ricerca SEADOG (Safety and Environmental Analysis Division for Oil & gas), afferente al dipartimento ENERGIA (DENERG), sta sviluppando un approccio innovativo per lo studio dei rilasci di gas incidentali in piattaforme off-shore, basato sulla fluidodinamica computazionale (CFD). Fino ad ora, nello studio dell'analisi di rischio, sono stati utilizzati metodi semi-empirici per la valutazione delle conseguenze, i risultati dei quali sono troppo conservativi. L'approccio CFD, invece, fornisce dei risultati molto più dettagliati, richiedendo, a sua volta, un notevole costo computazionale. Per ovviare a questo problema, si è pensato di sviluppare un approccio di tipo ibrido: viene simulata la fase di rilascio attraverso una scatola nera, o source box (concetto introdotto da [3] e [4]), e i suoi output vengono utilizzati come input per la fase successiva di dispersione. In questa maniera, costruendo una libreria di source box, si può "svincolare" lo studio di dispersione da quello di rilascio, caratterizzati da tempi di evoluzione diversi. Questo approccio ibrido, oggetto delle tesi [5], [6], [7] e [8],

svolte presso il laboratorio di ricerca SEADOG, consente un abbattimento del costo computazionale garantendo degli standard di accuratezza abbastanza elevati.

I modelli CFD sviluppati, affinché possano essere usati come strumenti per lo studio delle conseguenze di rilasci incidentali di gas, dovranno poi essere validati attraverso una campagna sperimentale: l'obiettivo di questo lavoro di tesi riguarda, dunque, la progettazione di un laboratorio sperimentale, "Lab SEASTAR" (Suistainable Energy Applied Sciences, Technology and Advanced Research), presso il quale effettuare esperimenti di rilascio di gas in pressione, simulando le medesime condizioni operative delle simulazioni CFD e ricreandone l'ambiente di prova con un modello di piattaforma in scala (mockup sperimentale) sito all'interno di una galleria del vento. Il presente elaborato di tesi ha come obiettivo la definizione dei requisiti funzionali e operativi del Lab SEASTAR e contribuire alla stesura di un documento di progetto riguardante la progettazione definitiva del laboratorio sperimentale, la quale, una volta ultimata, definirà ciascun sistema o apparato necessario al raggiungimento degli obiettivi preposti. A tal proposito, per la realizzazione del laboratorio SEASTAR si è ritenuto necessario dover progettare una galleria del vento a circuito aperto subsonica, il mockup sperimentale, il sistema di distribuzione di gas, la sensoristica, l'elettronica a servizio delle prove sperimentali, l'acquisizione e analisi dati e, infine, le opere civili. In particolare, questo elaborato intende definire più nel dettaglio i lavori analizzati preliminarmente da [9] e [10], come la progettazione della galleria del vento, la cui progettazione fluidodinamica, compiuta dal DIMEAS (Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale), è stata verificata ricorrendo all'utilizzo del software per simulazioni CFD "ANSYS Fluent", e la progettazione del modello in scala della piattaforma off-shore, considerando come vincoli di progetto le ipotesi adottate nell'implementazione dei modelli CFD innovativi sviluppati dal SEADOG e considerando i limiti geometrici dovuti alla struttura pre-esistente scelta come sede per la realizzazione del laboratorio sperimentale SEASTAR. Inoltre, i requisiti degli altri sistemi individuati (come il sistema di distribuzione di gas, la sensoristica, l'elettronica a servizio delle prove sperimentali, l'acquisizione e analisi dati) sono stati in parte analizzati, sebbene non rientrassero tra gli obiettivi di progettazione del presente lavoro di tesi. Infatti, la progettazione e la realizzazione finale del laboratorio SEASTAR prevede il coinvolgimento di diversi attori, e il buon esito del progetto richiede che tali attori condividano requisiti e soluzioni realizzative, coinvolgendo le altri parti interessate dal lavoro di progettazione specifico. Una volta terminata la fase di progettazione definitiva, sarà poi compito di "Environment Park S.pA." coordinare tali attori e provvedere alla stesura del progetto esecutivo, individuando i vari fornitori per la successiva fase di costruzione.

Oltre alla collaborazione con il laboratorio SEADOG, la stesura di questo elaborato è stata possibile grazie a una collaborazione con la società RAMS&E s.r.l. la quale mi ha permesso di seguire in prima persone le prime fasi della progettazione definitiva che porteranno alla nascita del laboratorio sperimentale "Lab SEASTAR, presso gli spazi messi a disposizione da Environment Park S.p.A. Nell'ambito della collaborazione in questo progetto, si segnala anche la partecipazione del DISAT (Dipartimento di Scienza Applicata e Tecnologia): tutti i dipartimenti e le parti citate precedentemente sono coinvolti in un progetto molto più ampio nato dalla collaborazione tra il Politecnico di Torino e il Ministero dello Sviluppo Economico (MISE) – Direzione Generale per la sicurezza, per la realizzazione di *"un polo multidisciplinare che svolgerà attività di studio, ricerca e innovazione tecnologica nell'ambito della sicurezza, anche ambientale, degli impianti di ricerca e coltivazione degli idrocarburi in mare"* [11].

1.2. STRUTTURA DELLA TESI

Come già accennato nel paragrafo di introduzione al contesto di lavoro, tale elaborato di tesi si colloca in un contesto che mira allo sviluppo di strumenti innovativi che possono essere usati nella fase progettuale degli impianti off-shore, nell'ambito della valutazione del rischio. In particolare, tali strumenti potranno poi essere usati nell'analisi delle conseguenze di un rilascio di gas in pressione a bordo di una piattaforma off-shore.

L'obiettivo di questo primo capitolo è introdurre il contesto e la struttura del lavoro, fornire una rapida panoramica riguardo i principali attori che hanno preso parte allo sviluppo del progetto e chiarire gli obiettivi che si intendono perseguire.

Gli obiettivi dei successivi due capitoli (Cap. 2 e Cap. 3) possono essere riassunti brevemente in:

- Introduzione al settore di riferimento dell'elaborato di tesi (settore Oil&Gas off-shore), con particolare attenzione verso il panorama italiano di piattaforme off-shore (la piattaforma di riferimento, a partire dalla quale è stato ottenuto il modello di piattaforma sperimentale, è stata selezionata sulla base della tipologia di piattaforma maggiormente presente al largo delle coste italiane);
- Fornire in maniera sintetica i principali concetti dell'analisi di rischio quantitativa (QRA) per il settore Oil&Gas off-shore.

Entrambi sono contestualizzati all'ambito di lavoro presso il quale si colloca il presente elaborato di tesi, ovvero la validazione di modelli CFD ibridi, utili nella fase di analisi delle conseguenze per la valutazione del danno derivante dal verificarsi di un determinato scenario incidentale (rilascio incidentale di gas metano), tramite campagna sperimentale in cui verranno effettuati rilasci di gas su un modello in scala di una piattaforma off-shore.

Si sono, dunque, ripresi i lavori di tesi svolti da [6], [7] e [8], presentati sotto forma di review al Capitolo 4, al fine di presentare il lavoro condotto presso il laboratorio di ricerca SEADOG e i risultati ottenuti con le simulazioni CFD. Il fenomeno di interesse delle simulazioni CFD riguarda il rilascio incidentale di gas metano ed è stato diviso in due fasi separate: la prima fase di rilascio, che avviene nei primi centimetri a partire dal foro di rilascio, è stata studiata in un dominio ridotto (la "Source Box"), mentre la fase successiva di dispersione è stata studiata in un dominio corrispondente alle dimensioni di piattaforma; il passo successivo è stato il "coupling" tra le due fasi, ovvero sono stati estrapolati i risultati della prima fase di rilascio e dati in input alla successiva fase di dispersione. L'obiettivo di tale approccio "*two-steps*" (così chiamato nel lavoro di tesi [8]) è separare, inizialmente, la fisica del fenomeno di rilascio dalla fisica del fenomeno di dispersione, caratterizzate da scale spaziali e temporali diverse, per poi ricongiungerle opportunamente tramite il coupling, con l'obiettivo ultimo di riuscire a ottenere una notevole riduzione del tempo di calcolo, rispetto al caso di simulazione CFD con approccio "*one-step*" classico.

Al fine di trattare il fenomeno di rilascio di gas nelle simulazioni CFD, sono state fatte delle ipotesi, riprese all'interno del Capitolo 4, e sono state valutate delle grandezze di interesse come il volume totale di gas, il volume di gas infiammabile e le aree lambite dal gas nel caso di uno scenario di rilascio di gas incidentale. Queste ipotesi saranno poi utilizzate nella progettazione del lab SEASTAR, in quanto la validazione delle simulazioni CFD necessitano di un confronto con un modello sperimentale che sia coerente con il modello utilizzato per lo svolgimento delle prove CFD. Le grandezze da mettere a confronto saranno il campo di vento e il campo di pressione che si sviluppano, e i valori di concentrazione di gas che si ottengono sul deck di riferimento della piattaforma.

Una volta introdotto il contesto di lavoro, e le ipotesi considerate nei lavori precedenti, ci si è concentrati sulle finalità e modalità operative del laboratorio sperimentale che si intende progettare (Capitolo 5). Tra le funzioni che dovrà assolvere il Lab SEASTAR e i vincoli (individuati da [8], [9] e [10]) che dovranno essere rispettati dalla progettazione, si riportano sinteticamente i seguenti:

- Ricreare il campo di vento che si avrebbe a bordo della piattaforma di riferimento nella situazione reale in mare aperto tramite la realizzazione di una galleria del vento;
- Ospitare il modello di piattaforma di riferimento delle simulazioni CFD da validare (in seguito chiamata "mock-up sperimentale") in scala 1:10;
- Simulare il rilascio incidentale di gas a bordo della piattaforma tramite un ugello di rilascio collegato all'impianto di distribuzione di gas;
- Raccolta risultati delle prove sperimentali, tramite un opportuno apparato di sensoristica, il cui scopo è il confronto dei dati raccolti con i risultati ottenuti dalle simulazioni CFD; è prevista anche la creazione di una sala di controllo, la quale ha il ruolo di monitorare e controllare il processo.

Una volta che sono stati individuati i vincoli derivanti dalle simulazioni CFD e le funzionalità attese dal laboratorio SEASTAR, si sono esaminati gli spazi messi a disposizione da Environment Park per la realizzazione del laboratorio sperimentale: sulla base delle planimetrie e di un sopralluogo in sede, sono stati individuati i vincoli per la progettazione fluidodinamica di una galleria del vento subsonica del tipo "circuito aperto, con camera di prova aperta" (Paragrafo 5.3), il cui CAD è stato realizzato tramite il software SOLIDWORKS, e la cui fluidodinamica è stata inizialmente simulata dal DIMEAS, e successivamente verificata ricorrendo all'utilizzo del software di simulazione CFD Ansys FLUENT.

L'altezza del flusso di vento generato in camera di prova della galleria del vento è stata utilizzata come vincolo progettuale per la scelta dell'altezza massima del mockup sperimentale, la cui progettazione ha richiesto un capitolo a parte (Capitolo 6). Infatti, uno degli step necessari per la progettazione del mockup sperimentale è stata l'analisi dei requisiti funzionali e strutturali che devono essere assolti dal modello di piattaforma; a titolo di esempio, il mockup deve:

- Provvedere a un alloggio stabile per ingombri (ovvero degli oggetti rappresentativi dei componenti che si avrebbero a bordo di una piattaforma off-shore reale);
- Fornire un apposito ingresso per l'ugello da cui verrà rilasciato la miscela di gas scelta per la fase sperimentale;
- Garantire diverse configurazioni possibili per la disposizione degli ingombri;
- Permettere il passaggio e l'alloggio dei cavi destinati alla sensoristica, senza modificare il layout del deck).

Per la progettazione del mockup sperimentale si sono utilizzati software CAD quali AutoCad e SolidWorks.

Nell'ultimo capitolo sono presentate le conclusioni e i possibili sviluppi che seguiranno la progettazione definitiva del Lab SEASTAR.

2. IL SETTORE OFF-SHORE OIL&GAS

La necessità di incrementare le riserve di idrocarburi, a causa di una crescente richiesta di energia, ha aiutato il posizionamento e il rafforzamento del settore off-shore. Si stima che circa il 90% del greggio e il 60 % del gas naturale prodotto nell'Unione Europea provenga da attività off-shore [12]. Nonostante le maggiori difficoltà realizzative, gli investimenti economici elevati e i rischi connessi, il settore off-shore Oil&Gas ha guadagnato spazio e ottenuto credibilità nel mondo dell'estrazione degli idrocarburi grazie al progresso tecnologico, che ha consentito l'esplorazione e la trivellazione di zone lontane dagli affioramenti conosciuti. Lo scopo del presente capitolo è fornire, dunque, una descrizione delle principali tipologie di piattaforme off-shore presenti, soprattutto per quanto riguarda le piattaforme di produzione, e esplorare il contesto italiano off-shore, poiché la scelta della tipologia di piattaforma di riferimento è ricaduta sul modello di piattaforma presente maggiormente tra le installazioni italiane off-shore.

2.1. STRUTTURE OFF-SHORE

Le strutture off-shore possono essere distinte in due tipologie:

- *Strutture di perforazione*, ovvero dei natanti progettati per la perforazione destinata alla realizzazione di pozzi esplorativi, il loro scopo è fare emergere la presenza di giacimenti di determinate dimensioni tali da giustificare l'avvio della progettazione di strutture di produzione;
- *Strutture di produzione*, ovvero delle strutture destinate all'estrazione e al trattamento degli idrocarburi, la cui dimensione varia a seconda la dimensione del giacimento e distanza dalla costa.

Tra le strutture di produzione, possono essere individuate le seguenti macro-categorie, in relazione alla distanza dalla costa e alla profondità dell'acqua in corrispondenza del giacimento [13]:

- Piattaforme a struttura fissa;
- Piattaforme a struttura galleggiante.

Gli impianti di produzione sono collegati ai pozzi di produzione, situati al di sotto del fondale marino, e devono ospitare i sistemi di trattamento e di processo degli idrocarburi prodotti. Per una descrizione generale del processo di estrazione del gas si rimanda al paragrafo 2.4

In Figura 2 sono visibili i vari tipi di piattaforma offshore. È possibile apprezzare come la tipologia di ancoraggio, e quindi di piattaforma, cambi al variare della profondità del fondale marino.



Figura 2: Tipologie di piattaforme offshore [13]

Una descrizione generale delle diverse piattaforme di produzione sarà fornita, rispettivamente, nei paragrafi 2.2 e 2.3, in cui verranno esposte le principali differenze.

Ciò che accomuna le due categorie di piattaforme precedentemente citata è il "topside", cioè la parte emersa della piattaforma che presenta degli elementi simili tra le due categorie, come è visibile in Figura 2. Per esempio, è possibile citare l'eli-deck (zona adibita al decollo e atterraggio degli elicotteri necessari per il trasporto del personale e per le emergenze), gli alloggi per il personale, le gru per il carico o lo scarico di merci, e le torri di perforazione (se il pozzo è stato realizzato in passato, non è necessaria la realizzazione della torre di perforazione).

2.2. PIATTAFORMA DI PRODUZIONE A STRUTTURA FISSA

Questa tipologia di piattaforma può essere costituita da una base di calcestruzzo o da una struttura rinforzata reticolare in acciaio: la prima tiene in posizione corretta la piattaforma per via della gravità; la seconda è invece ancorata al fondale marino. Si veda la Figura 3 per un confronto fra le due tipologie di ancoraggio differenti.



Figura 3: A sinistra, un esempio di piattaforma con base in calcestruzzo che tiene in posizione la piattaforma per gravità; a destra, un esempio di piattaforma con struttura reticolare in acciaio [13]

Si ricorre all'utilizzo di queste tipologie di piattaforme per profondità dei fondali marini fino a circa 400 m.

Per profondità maggiori, dell'ordine di 400 – 900 m, si ricorre alla *compliant tower*, ovvero una struttura reticolare simile alla struttura in acciaio utilizzata per le piattaforme a struttura fissa, ma più snella e flessibile. La differenza, quindi, con le due strutture fisse discusse a inizio paragrafo, ricade nella capacità di flettersi sotto l'effetto delle onde, in maniera analoga alle strutture galleggianti; si veda Figura 4 per un esempio di compliant tower.



Figura 4: Esempio di compliant tower; la struttura reticolare è più snella e sensibile rispetto a una struttura in acciaio fissa [14]

2.3. PIATTAFORMA DI PRODUZIONE A STRUTTURA GALLEGGIANTE

Le piattaforme a struttura galleggiante consentono di raggiungere profondità dell'ordine 1000 – 3000 m. Tra queste, è possibile citare la *tension-leg platform*, cioè una piattaforma galleggiante a gambe in tensione, che consente di raggiungere profondità di circa 1500 m. La *tension-leg platform* è caratterizzata da un sistema di ancoraggio costituito da tiranti, raggruppati in fasci, i quali sono tenuti in tensione sfruttando il galleggiamento della piattaforma.



Figura 5: Tension leg platform; la base galleggiante è tenuta in posizione dai fasci di tiranti tenuti in tensione (tension-leg) [15]

L'elevata rigidità assiale dei fasci tiranti verticali è tale da eleminare ogni movimento verticale della piattaforma.

Tra le altre piattaforme a struttura galleggiante è possibile citare la piattaforma *SPAR*, al quale consente di raggiungere profondità molto elevate (circa 3000 m). Una piattaforma SPAR è costituita da imponenti colonne verticali, tenute in tensione grazie a cavi di ormeggio ancorati al fondo marino.



Figura 6: Top-side di una piattaforma SPAR [16]

Infine, si citano i *Floating Production Systems* (FPS) e i *Floating Production Storage and Off-loading system* (FPSO). Queste imponenti navi sono dotate di facility progettate per processare, stoccare e svuotare prodotti petroliferi. Gli FPS sono simili a un impianto di perforazione, ma sono mantenuti in posizione tramite catene ancorate al fondale marino. Queste navi sono collegate al Subsea Production system, il quale, tramite dei risers, manda il petrolio alle facility di superficie. Gli FPSO invece sono navi con una notevole capacità di stoccaggio, e anch'essi sono collegati al Subsea Production system.



Figura 7: Confronto fra piattaforma SPAR, FPS e FPSO [17]



Figura 8: Floating Production System [13]

2.4. PROCESSO DI ESTRAZIONE DI GAS NATURALE IN UNA PIATTAFORMA OFF-SHORE

In questo paragrafo è descritto il processo di estrazione di gas naturale che avviene in una piattaforma off-shore. La descrizione del processo aiuterà il lettore nella comprensione delle scelte dei parametri che si è deciso di utilizzare per la progettazione del laboratorio.

Il processo di estrazione avviene dal giacimento posto nel sottosuolo: il prodotto estratto risulta essere un fluido trifase (mix di olio, gas, acqua marina e sabbia) e, dunque, deve essere "trattato". Il fluido trifase è mandato a un separatore trifase in cui avviene una prima separazione tra gas, acqua e condensato.

Il gas ottenuto deve essere trattato e "desolforato": il solfuro di idrogeno H2S deve essere rimosso dal gas "sporco". Si otterrò del gas acido, il quale verrà ulteriormente trattato per ottenere dei prodotti secondari, mentre la restante parte (gas di coda) andrà all'inceneritore.

Il gas non acido (quindi privo di H2S) deve essere ulteriormente trattato in quanto contiene delle tracce di acqua e di azoto, ottenendo così il "sales gas" metano. Si procede anche al recupero degli altri idrocarburi presenti (come Etano, Propano, Butano ecc) tramite il frazionamento e addolcimento. In Figura 9 è rappresentato l'intero processo.



Figura 9: Processo schematizzato di estrazione del gas da un pozzo [10]

Dunque, tra i gas presenti in una piattaforma off-shore, il CH4, l'H2S, la CO e la CO2 sono i principali gas tossici, e quindi possono essere considerati importanti per lo studio di rilasci.

Occorre specificare che il CO, la CO2 e l'H2S non saranno oggetto di studio come rilascio di gas incidentale: i primi due non saranno trattati poiché sono dei gas esausti rilasciati da apparecchiature come generatori diesel o turbine, mentre l'H2S in quanto la sua presenza risulta concentrata in una zona ristretta dell'impianto (cioè in prossimità della zona in cui avviene la desolforazione del gas).

Nel proseguo del progetto ci si è concentrati sui rilasci da apparecchiature in pressione contenenti solo metano, in quanto è il componente presente in maggiore quantità nel gas naturale [18].

2.5. SISTEMI DI SICUREZZA PER IMPIANTI DI PRODUZIONE OFF-SHORE

Prima di entrare nel dettaglio della tematica del presente elaborato, occorre esaminare brevemente i principali sistemi di sicurezza che sono adottati nei sistemi di produzione off-shore.

Tra i sistemi di sicurezza presenti in un impianto di produzione off-shore, è importante citare [12]:

Sistema	Descrizione
	Costituito da generatori alimentati a
Generazione d'emergenza	gasolio, i quali si attivano in caso di
	mancato funzionamento dei sistemi di
	generazione primaria
	Interviene in caso di mancato fallimento
	sia del sistema di generazione primaria,
Uninterrutible Power Supply (UPS)	sia del sistema d'emergenza; è costituito
	da una serie di batterie in grado di
	alimentare l'intero sistema di produzione
Places dell'impigute (Dus dustion Shut	Interviene bloccando il flusso di
Down)	produzione degli idrocarburi in caso di
Down)	incidente
	Sulle piattaforme a gas, in caso di
Seguine dell'impigate (Emergence, Shut	incidente, interviene scaricando il flusso
Down)	degli idrocarburi in atmosfera e bloccando
Down)	sia l'arrivo dai pozzi che la partenza verso
	le flow lines
	Costituito da una serie di sensori
	distribuiti in tutta la piattaforma; consente
Pilovaziona	di rilevare principi di incendi, fughe di gas
Kilevazione	ed atmosfere nocive; è in grado di attivare
	i sistemi di allarme, di blocco attività e di
	protezione
	Può essere alimentato ad acqua (prelevata
Protezione antincandio attiva	direttamente dal mare), a schiuma, a CO2
	e a gas inerte (stoccati direttamente sulla
	piattaforma tramite appositi contenitori)
Protoziona antincandia nassina	Consiste nell'applicazione di materiali
1 rolezione antificentito pussiva	resistenti alle alte temperature su tutti gli

Tabella 1: Riepilogo dei principali sistemi di sicurezza in un impianto di produzione off-shore

	elementi strutturali e su tutti gli impianti a
	rischio per una prolungata esposizione al
	fuoco in caso di incidente
	Costituito da scale alla marinara,
Evacuazione del personale	scialuppe e zattere di salvataggio,
	distribuiti sull'intera struttura
	Costituito da giubotti salavagente,
Sicurezza e protezione del personale	maschere antigas, docce da utilizzare in
	caso di contatto con sostanze pericolose
	ecc
	Il sistema di allarme è costituito da
	dispositivi acustici e visivi che entrano in
	funzione automaticamente in caso di
Allarme e telecomunicazione	emergenza; il sistema di
	telecomunicazione consente la
	comunicazione tra il personale a bordo e
	l'esterno

2.6. IL SETTORE "OFF-SHORE" IN ITALIA

Si è ritenuto utile riportare qualche nota riguardante la storia e le installazioni off-shore italiane. La piattaforma di riferimento infatti è stata selezionata sulla base del parco di piattaforme off-shore presenti. Inoltre, l'Italia, pur non rientrando tra i grandi produttori di idrocarburi del mondo, ha contribuito considerevolmente alla nascita e allo sviluppo delle tecnologie legate agli idrocarburi [19].

La storia dell'esplorazione petrolifera italiana ha origine nel 1800, durante il quale si segnalarono numerose manifestazioni superficiali di idrocarburi, suscitando l'interesse di molti geologi in campo internazionale.

Nei primi anni del 1900 venne fondata la SPI (Società Petrolifera Italiana), temporaneamente associata alla Esso e protagonista del panorama italiano di produzione petrolifera grazie all'impiego di soluzioni tecnologie innovative per quel periodo (i primi risultati furono ottenuti grazie all'utilizzo della perforazione a percussione, successivamente sostituita dal sistema a rotazione).

Nel 1926, lo Stato italiano decise di intervenire nell'esplorazione petrolifera fondando l'Agip, la quale avviò una serie di campagne di ricerca in territorio estero, come in Albania, Libia, Eritrea, Somalia e Iraq.

Successivamente all'introduzione del rilevamento sismico a riflessione, tramite il quale fu possibile approfondire la conoscenza delle caratteristiche del sottosuolo, venne scoperto in Pianura Padana (precisamente a Caviaga, presso Lodi) il primo grande giacimento a gas dell'Europa Occidentale da parte dell'Agip (1944). Nel 1945, Enrico Mattei venne nominato Commissario Straordinario di Agip e vennero avviate delle campagne di ricerca di nuovi giacimenti in Pianura Padana, le quali portarono alla scoperta e alla diffusione dell'utilizzo di gas naturale, sia nell'ambito industriale che in quello residenziale, grazie anche alla rete di condotte realizzate da Snam.

Nel 1953 venne istituita l'Eni con Enrico Mattei alla Presidenza.

Durante gli anni '50, l'esplorazione petrolifera si estese al di fuori della regione padana, spostandosi prima verso le Prealpi friulane e l'Appennino marchigiano-abruzzese, poi verso la Sicilia (Gagliano, Ragusa e Gela).

Nel 1959 si ebbe l'esecuzione del primo pozzo off-shore in Europa: esso fu realizzato al largo di Gela, con lo scopo di controllare l'estensione a mare del giacimento (Agip 1959), a cui seguirono i successi di *Perla* e *Vega*.

Le nuove normative riguardanti il settore offshore incentivarono la ricerca, e portarono numerose e importanti scoperte di gas nell'Adriatico Ravennate e nell'Adriatico Centrale (1963-1968).

L'Italia risultò essere nuovamente all'avanguardia nel campo dell'esplorazione offshore quando, durante i primi anni del 1990, venne realizzato il primo pozzo in *acque profonde* (oltre 800 metri) da parte dell'Agip al largo delle coste pugliesi.

In quel periodo (fine anni '80, inizio anni '90) la produzione italiana annuale di olio e gas raggiunse i 20 milioni di tonnellate equivalenti di petrolio, risultando inferiore soltanto a Olanda e Regno Unito tra i Paesi dell'Europa Occidentale.

2.6.1. Analisi del contesto off-shore italiano

Come si può evincere dai rapporti del MISE [20], in Italia sono presenti 138 piattaforme marine, di cui 8 sono inattive e 10 sono, invece, le strutture marine ammissibili come supporto alla produzione.

La maggior parte (circa il 90%) delle piattaforme marine adibite all'estrazione di gas naturale è situata nel Mar Adriatico, mentre lungo le coste pugliesi o siciliane si trovano impianti di estrazione di olio.

Si rimanda alla Figura 10 e alla Figura 11 per avere un'indicazione più precisa riguardo le zone di installazione delle piattaforme off-shore italiane.



Figura 10: Carta delle concessioni di coltivazione delle piattaforme marine nel Mar Adriatico "Alto" [21]



Figura 11: Carta delle concessioni di coltivazione delle piattaforme marine nel Mar Adriatico "Basso" e Sicilia [21]

Dalla Figura 10 e dalla Figura 11 è visibile il limite delle 12 miglia, introdotto con il Decreto Ministeriale del 9 Agosto 2013 e in cui sono state ridefinite le aree marine di competenza italiana dove è possibile svolgere attività di prospezione e ricerca di idrocarburi off-shore; ogni nuova iniziativa entro le 12 miglia dalla costa risulta essere vietata. Ad oggi, 95 installazioni rientrano nel limite delle 12 miglia.

Per via della bassa profondità delle acque del territorio italiano, soprattutto per quanto riguarda la zona del Mar Adriatico "Alto", quasi tutte le piattaforme sono del tipo "a struttura fissa", caratterizzate da una struttura reticolare a 8 o a 4 gambe, e con un numero di deck (cioè i piani che costituiscono la piattaforma off-shore) che varia tra 2 e 3.

A titolo di esempio, sono riportate in Figura 12, 3 piattaforme presenti nella zona del Mar Adriatico Alto: BARBARA C, BARBARA T e BARBARA T-2.



Figura 12: BARBARA C, BARBARA T e BARBARA T-2, 3 piattaforme a struttura fissa reticolare presenti nel Mar Adriatico Alto [22]

A valle dell'analisi del parco di piattaforme off-shore di produzione presenti sul territorio italiano, si è scelto ([8]) come sito di interesse la zona delle acque poco profonde del Mar Adriatico. È stata individuata una tipologia di piattaforma a struttura fissa, costituita da 3 deck, in quanto maggiormente rappresentativa del panorama off-shore italiano. Va considerato che la base strutturale, come verrà chiarito in seguito, non risulta essere di fondamentale importanza per gli scopi del progetto.

3. ANALISI DI RISCHIO

3.1. INTRODUZIONE ALL'ANALISI DI RISCHIO

Il settore Oil & Gas off-shore è caratterizzato da progetti ingegneristici molto complessi e ambiziosi, e risulta essere una delle maggiori fonti di guadagno per molti paesi. Incidenti nel settore off-shore, come gli incidenti a Piper Alpha nel 1988 o nel Golfo del Messico nell'Aprile 2010, hanno causato dei danni ambientali, per il business e per il personale non indifferenti, suscitando notevole interesse nell'opinione pubblica. L'emissione della Direttiva 2013/30UE da parte del Parlamento Europeo e del Consiglio del 12 Giugno 2013, riguardante la sicurezza delle operazioni in mare nel settore degli idrocarburi, come già citato nel capitolo introduttivo, promuove il raggiungimento di elevati standard di sicurezza per la prospezione, ricerca e produzione degli idrocarburi, attraverso la riduzione delle probabilità di accadimento di incidenti gravi e la mitigazione delle loro conseguenze.

Uno dei punti cruciali per la fase di progettazione di una piattaforma offshore, come indicato nella Direttiva 2013/30UE, risulta essere, l'*analisi di rischio*: metodologia sviluppata per studiare e classificare i rischi associati alla presenza e operatività di un determinato sistema tecnologico. Grazie a questo tipo di analisi, i punti deboli di un sistema possono essere individuati e possono essere analizzate le conseguenze che un problema potrebbe causare al sistema. Questo tipo di approccio fornisce dei risultati che possono essere usati per implementare delle strategie nell'ottica di ridurre il rischio associato a determinate conseguenze.

Il *rischio* è la combinazione tra la probabilità che un determinato evento possa verificarsi, e la conseguenza (o danno) che tale evento possa causare. In termini matematici, il rischio legato a un singolo scenario può essere espresso come [23]:

$$R_i = f_i * D_i^{k}$$

dove:

- R_i è il rischio associato a un singolo scenario [danno/anno];
- f_i è la frequenza di accadimento di un determinato scenario [eventi/anno];
- D_i è il danno associato a un determinato scenario [danno/evento];

- k è un fattore che tiene conto della percezione di rischio da parte dell'opinione pubblica¹.

Nel caso in cui fossero presenti più scenari, il rischio totale può essere espresso come somma dei rischi di ogni singolo scenario i-esimo:

$$R_{tot} = \Sigma_i R_i = \Sigma_i f_i * D_i^k$$

In altre parole, la valutazione del rischio consiste nella:

- Individuazione di tutte le possibili cause di malfunzionamento del sistema;
- Identificazione delle loro conseguenze;
- Valutazione dell'impatto che hanno tali conseguenze sull'area dove è situato il sistema;
- Valutazione del danno causato a persone, apparecchiature, ambiente e reputazione della compagnia;
- Stima del rischio associato e definizione della sua tollerabilità;
- Implementazione di misure preventive o mitiganti, con lo scopo di ridurre il rischio.

Prima di procedere con la valutazione del rischio, bisogna scegliere con che tipo di dettaglio si vuole analizzare un determinato sistema: l'approccio con cui va affrontato lo studio del rischio dipende dalla complessità del sistema e dall'entità degli eventi incidentali possibili.

I diversi approcci possibili sono indicati in Tabella 2, e per chiarezza visiva in Figura 13.

Approccio	Descrizione
Qualitativo	Parametri di danno e probabilità sono determinate
	con procedure puramente qualitative
Semi-Quantitativo	Parametri di danno e probabilità sono
	approssimati, utilizzando un certo range di
	validità
Quantitativo (Quantified Risk Assessment)	Tutti i parametri vengono calcolati e quindi
	quantificati

Tabella 2: Tipologie di approcci per l'analisi del rischio

¹ Un evento catastrofico che causa un numero considerevole di morti con una frequenza di accadimento molto bassa, può avere lo stesso valore di rischio di un evento con pochi morti ma con un'elevata frequenza di accadimento. Il fattore k tiene conto, per l'appunto, della differente percezione del rischio da parte dell'opinione pubblica, per la quale un danno elevato e una frequenza di accadimento bassa rappresenta un rischio molto meno accettabile rispetto al rischio generato da un danno di entità piccola caratterizzato da una frequenza elevata.



Figura 13: Rappresentazione dei tipi di approcci applicabili per la valutazione di rischio [24]

Per sistemi poco complessi e caratterizzati da livelli di rischio bassi, un approccio di tipo qualitativo sarà più che sufficiente per la valutazione del rischio; al crescere della complessità del sistema e/o del livello di rischio, gli approcci di tipo quantitativo risultano necessari.

Gli approcci qualitativi e semi-quantitativi verranno tralasciati nel proseguo del presente elaborato; nel seguente paragrafo verrà trattato l'approccio QRA, essendo di interesse specifico per il settore Oil & Gas off-shore.

3.2. "QUANTITATIVE RISK ASSESSMENT" PER IL SETTORE OIL & GAS OFF-SHORE

3.2.1. Introduzione alla QRA

La *Quantitative Risk Assessment* (QRA) è un tool sviluppato fin dagli anni 1980 per fornire assistenza ai sistemi di gestione della sicurezza, e può essere utilizzato durante la fase di Planning, Front End Engineering Design, Costruzione, Commissioning, Produzione, Decomissioning and Disposal o modifiche nei sistemi di processo [23]. E' applicato in diversi settori, come nel settore nucleare, chimico e Oil & Gas, specialmente nel settore off-shore [14].

3.2.2. Raccolta dei dati storici

Uno dei primi passi per stilare la QRA è la *raccolta dei dati storici*, ovvero raccolta di informazioni legate all'attività della piattaforma e di dati storici contenuti in database riguardanti la sicurezza e affidabilità dei sistemi e dei componenti di processo.

3.2.3. Hazard Identification

Lo step successivo consiste nell'*identificazione dei pericoli (Hazard Identification)*, tramite un'analisi dei possibili incidenti con lo scopo di ottenere una stima qualitativa dei rischi e dei suggerimenti per la prevenzione. Durante questa fase, l'identificazione di tutti i *major hazard* durante le varie attività della piattaforma è fondamentale, in quanto essi si riflettono direttamente sui risultati della QRA. Occorre anche specificare che tra i *major hazard* legati al settore Oil & Gas off-shore, possiamo distinguere due classi:

- Hydrocarbon hazards;
- Non- hydrocarbon hazards.

La prima classe dipende dal sistema e dal fluido di processo, sui quali si può intervenire o controllare tramite il *Safety Instrumented System* (SIS) o tramite sistemi di protezione anti-incendio passivi, mentre la seconda classe, per esempio, include rischi occupazionali, collisioni con navi o con elicotteri e può essere molto complesso riuscire a intervenire con misure tecniche per ridurne i rischi.

Tra gli strumenti utilizzati per la Hazard Identification si segnalano:

- Analisi HAZID;
- Analisi HAZOP;
- Analisi "What-if";
- Analisi FMEA.

Le metodologie appena citate consentono di approcciare lo studio di un particolare sistema in una maniera strutturata, tale da fornire indicazioni qualitative riguardo i potenziali incidenti che possono accadere, le loro cause scatenanti e le conseguenze generate.

3.2.4. Valutazione delle frequenze

Una volta eseguita la "Hazard Identification", si passa alla valutazione delle frequenze che consiste nella stima della probabilità con cui ogni "evento" (individuato durante la Hazard Identification) si può presentare.

Per determinare la frequenza di fallimento dei componenti si può ricorrere all'utilizzo dei disegni P&ID (Piping & Instrumentation Diagram) e a raccolte di dati riguardanti fallimenti dei singoli componenti di processo (come valvole, pipe, strumenti di misura ecc.) in diverse condizioni operative. Per determinare la frequenza di un determinato evento, si ricorre all'utilizzo della *Event Tree Analysis*, una tecnica basata su diagrammi basati su logica binaria, in cui un evento può accadere o non accadere. Lo scopo dell'ETA è l'identificazione e la stima della probabilità con cui, a partire da un evento iniziatore, si possono presentare i diversi scenari. In Figura 14 un esempio di *albero degli eventi*.



Figura 14: Esempio di Event Tree o albero degli eventi; a partire da un evento iniziatore (come la rottura di una tubazione) viene costruito un "albero" basato su logica binaria, il quale determina le varie sequenze incidentali che si possono venire a creare a causa dell'evento iniziatore; ogni sequenza incidentale è caratterizzata da una frequenza di accadimento [25]

3.2.5. Analisi delle conseguenze

Poiché il rischio è una combinazione di frequenza e conseguenza, l'*analisi delle conseguenze* risulta uno step necessario nella valutazione del rischio. Durante una QRA, l'analisi delle conseguenze dovrebbe includere dei sotto-studi, che possono essere presentati come parte della QRA stessa o tramite studi separati. Tra questi, risultano rilevanti per il settore Oil&Gas:

 Perdite di sostanze infiammabili, sulle quali si effettuano calcoli sul rilascio (portata, durata, ecc), calcoli sul potenziale di ignizione, calcoli del carico termico dovuto all'incendio, calcolo del carico esplosivo e possibili effetti domini;

- Blowout (eruzione incontrollata dei pozzi);
- Impatti esterni, come quelli generati da collisioni, impatti dovuti a elicotteri, rischi occupazionali ecc.

Quando avviene l'ignizione di una particolare sostanza infiammabile, i possibili risultati possono essere:

- Jet fire (quando si ha rilascio di gas o condensati);
- Pool fire (quando si ha rilascio liquidi o bi-fase);
- Flash fire (quando si ha l'ignizione di una nuvola infiammabile);
- Vapor cloud explosion;
- Esplosione fisica dovuto a una sovrapressione.

Normalmente, le conseguenze di particolari eventi sono presentate in termini di fatalità, come, per esempio, il numero di morti per incidente. Possono essere individuate le seguenti tipologie di fatalità:

- Fatalità immediata;
- Fatalità durante la fuga;
- Fatalità durante l'evacuazione.

Si segnala che la maggior parte degli eventi fatali rientra nella categoria di fatalità immediata.

3.2.6. Calcolo e valutazione del rischio

A questo punto, si può passare al calcolo del rischio, il quale può essere presentato nelle seguenti forme:

- Rischio individuale specifico locale, il quale tiene conto del rischio in una particolare zona, considerando un individuo sempre presente per 24 ore al giorno, per 365 giorni all'anno;
- Rischio individuale per anno, il quale tiene conto di quanto tempo una persona spende in un anno in una particolare area della piattaforma;
- Rischio sociale (Potential Loss of Life), il quale tiene conto del rischio di un gruppo di persone appartenenti a una determinata area.

Gli spazi congestionati e limitati di una piattaforma off-shore richiedono delle particolari attenzioni per quanto riguardo i possibili effetti domino. La presenza di grandi quantità di idrocarburi, temperature elevate, pressioni alte e spazi congestionati aumentano la probabilità di scatenare un effetto domino qualora un incidente dovesse presentarsi. Per contrastare gli effetti domino si può ricorrere a un'adeguata protezione antiincendio passiva per strutture e equipaggiamenti, usando, per esempio, del rivestimento cementizio o del rivestimento epossidico intumescente.

L'ultima parte dello studio riguarda il confronto tra il rischio associato ad ogni sequenza incidentale con dei criteri di accettabilità. In Figura 15 sono mostrati i criteri di accettabilità del rischio.



Figura 15: Esempio di livelli di accettabilità del rischio [25]

La banda inferiore comprende un livello di rischio che è ritenuto accettabile in quanto è paragonabile al rischio di fondo al quale è sottoposto un essere umano durante la sua vita: nessun intervento di mitigazione del rischio è richiesto in questa fascia. La banda superiore comprende rischi che sono considerati troppo elevati e che devono essere necessariamente ridotti affinché il progetto possa andare avanti. Nella banda di mezzo sono considerati tutti quei rischi elevati rispetto al rischio di fondo al quale è esposto un essere umano, ma che determinano dei "benefici" all'individuo e alla comunità. La logica di mitigazione per questa fascia è riassunta con il termine "ALARA": As Low As Reasonable Achievable. Deve essere dimostrato che tutti i rischi rientranti nella zona ALARA devono essere compresi in fondo, misure di controllo devono essere posizionate e le misure di mitigazione devono essere commisurate al livello di rischio posto.

4. MODELLAZIONE CFD DEI RILASCI DI GAS IN PRESSIONE

Il seguente capitolo ha lo scopo di riprendere i lavori passati avviati da [6], [7] e [8], i quali hanno poi determinato le ipotesi progettuali considerate nel presente lavoro di tesi. Come già anticipato nel capitolo introduttivo, tali lavori si collocano nell'ambito della valutazione delle conseguenze del danno di un rilascio incidentale di gas infiammabile in piattaforma; in particolare, si è cercato, con i lavori di tesi [6], [7] e [8], di sviluppare un metodo innovativo per l'analisi numerica predittiva di rilasci incidentali di gas.

Il problema di interesse riguarda il rilascio di gas naturale in pressione in un deck della piattaforma, i cui parametri principali di rilascio sono qui di seguito elencati:

- Pressione di rilascio pari a 10 bar;
- Pressione ambiente circostante pari a 1 bar;
- Diametro foro pari a 1 cm;
- Presenza di ostacoli.

Nel corso del capitolo verranno, dunque, prima mostrate le basi del fenomeno fisico di rilascio di gas in pressione, e successivamente saranno richiamati i lavori riguardanti la modellazione CFD del rilascio di gas a bordo della piattaforma off-shore, i quali hanno condotto alla definizione dei vincoli progettuali adottati nella successiva progettazione del laboratorio SEASTAR, come, per esempio, per quanto riguarda la scelta della tipologia di piattaforma di riferimento. Un paragrafo a parte merita il concetto di *Source Box*, introdotto da [4] e di fondamentale importanza per capire le scelte progettuali effettuate per l'accoppiamento del mockup sperimentale con il sistema di distribuzione di gas, adibito al rilascio di gas direttamente sul modello di piattaforma sperimentale.

Infine, sono state riportate le conclusioni riguardanti le simulazioni CFD, sulle quali si è basato il lavoro di tesi di [8], per poter individuare le grandezze di riferimento che dovranno essere monitorate nel laboratorio sperimentale SEASTAR per il fine ultimo di validare il modello CFD sviluppato. Ciò ha consentito di inquadrare i requisiti funzionali che devono essere assolti dal laboratorio SEASTAR, trattati al Capitolo 5.
4.1. FISICA DEL FENOMENO DI RILASCIO DI GAS IN PRESSIONE

Tra i parametri utilizzati per definire la tipologia di efflusso che si genera a valle di un rilascio di gas in pressione si hanno:

- *Rapporto delle pressioni*, definito come il rapporto tra la pressione ambiente P_{amb} e la pressione di rilascio P_0 , o in formula matematica

$$R_{pr} = \frac{P_{amb}}{P_0}$$

- Rapporto critico delle pressioni, definito come

$$R_{cr} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

dove k è il coefficiente di dilatazione adiabatica dei gas, ed è \sim 1.4 per il metano.

Per le condizioni scelte ($P_0 = 10 \text{ bar e } P_{amb} = 1 \text{ bar}$), si ottiene un rapporto delle pressioni inferiore al rapporto critico ($0,1 \approx R_{pr} < R_{cr} \approx 0,5$), e dunque l'efflusso sarà di tipo *sonico*: la velocità di uscita del gas sarà pari a quella del suono e la pressione di scarico P_{sc} sarà pari alla pressione critica P_{cr} . La pressione critica, in particolare, sarà pari a:

$$P_{cr} = R_{cr} * P_0 = P_{sc} \approx 5 bar$$

Si rimanda alla Figura 16 per chiarire visivamente cosa si intende per pressione di scarico e quale sia la differenza con quella ambiente: la pressione di scarico è la pressione che si verifica esattamente sulla sezione del foro.



Figura 16: Tipologia di foro, rappresentato da un ugello convergente; P_0 è la pressione di rilascio, P_2 è la pressione di scarico e P_s è la pressione ambiente [26]

Un altro parametro utilizzato è il *numero di Mach M*, definito come il rapporto della velocità di efflusso del gas *u* e la velocità del suono *c*:

$$M = \frac{u}{c}$$

Poiché l'efflusso è di tipo sonico, si ha:

M = 1

Questo parametro è importante per determinare se gli effetti di comprimibilità del getto sono trascurabili o meno: gli effetti di comprimibilità non sono trascurabili per M > 0,3. Dunque, la fase di rilascio è caratterizzata da un efflusso sonico i cui fenomeni di comprimibilità non sono trascurabili. Una volta che il flusso avrà rallentato "abbastanza" (M < 0,3), il fluido potrà essere considerato incomprimibile.

Inoltre, poiché $P_{sc} > P_{amb}$, il getto rilasciato in ambiente sarà sotto espanso, e dunque seguirà un'ulteriore espansione in atmosfera. È utile definire il parametro *grado di sotto espansione* η_0 come il rapporto della pressione di rilascio P_0 e la pressione ambiente P_{amb} :

$$\eta_0 = \frac{P_0}{P_{amb}}$$

Tramite la determinazione di tale parametro è possibile conoscere la "struttura" del getto che si genera [27]. Per esempio, per valori del grado di sotto espansione $\eta_0 > 7$, il getto è del tipo "altamente sotto espanso" e presenta un'unica cella a caratterizzare l'intera zona del core. Si nota in Figura 17 come per un getto altamente sotto espanso si passi da una zona caratterizzata da $M \gg 1$ a $M \le 1$ in cui il getto diventa subsonico; in corrispondenza di tale transizione di regime di moto, è presente una "struttura" detta "*disco di Mach*" la quale rappresenta la discontinuità fluidodinamica in cui si ha la transizione da regime sonico a regime subsonico.



Figura 17: Getto altamente sotto espanso [27]

Un altro parametro da prendere in considerazione è il "numero di Reynolds Re", definito come $Re = \frac{\rho * v * D}{\mu}$ ed utilizzato nello studio dell'interazione getto-cilindro: tale parametro consente di definire il passaggio da moto laminare a moto turbolento per $Re > 2,5 * 10^5$. I valori di Re in gioco ($Re \approx 5 * 10^5$) indicano che il getto che impatta contro l'ostacolo cilindrico è di tipo turbolento, e nell'ipotesi di *no slip boundary condition*, la velocità del getto è nulla a contatto con la parete dell'ostacolo cilindrico, mentre aumenta spostandosi verso gli strati più esterni. A causa dell'elevata turbolenza e alla differenza di pressione che si genera tra monte e valle del cilindro si generano gli effetti mostrati in Figura 18: il flusso tende a aderire alla superficie del cilindro, ma se la turbolenza è troppo elevata si ha il distacco della vena fluida a valle del cilindro.



Figura 18: Interazione getto turbolento – cilindro [4]

Questi sono i principali effetti che si hanno a seguito del rilascio di gas in pressione nelle condizioni indicate a inizio capitolo. Tali effetti si esauriscono in uno spazio ridotto, e da un certo punto in poi non si avranno più gli effetti di comprimibilità e il flusso passerà da regime sonico a subsonico. Il dominio caratterizzato da effetti di comprimibilità è stato gestito con il concetto di *"Source Box"*, oggetto del Paragrafo 4.4.

4.2. RICHIAMI DEI LAVORI PRECEDENTI

Lo scopo dell'analisi delle conseguenze consiste in una valutazione della zona di pericolo intorno all'area di rilascio, o in altre parole, si vuole prevedere la quantità di sostanza di gas infiammabile che si libera a seguito di un incidente di rilascio, e come questa possa disperdersi a bordo della piattaforma.

In letteratura scientifica sono presenti dei modelli empirici che consentono di valutare l'area di pericolo intorno all'area di rilascio, ma essi si basano su un approccio molto conservativo, che porta inevitabilmente a delle sovrastime dei risultati. Inoltre, tali modelli sono stati studiati solo per alcuni casi, come il *TFJ (Turbulent Free Jet)* che si riferisce a getti liberi ed è caratterizzato da un campo di applicazione limitato, mentre non esistono, per esempio, modelli empirici capaci di descrivere il caso di un getto che impatta contro un ostacolo cilindrico.

Si è scelto dunque di sviluppare un approccio innovativo basato sulla *fluidodinamica computazionale (CFD)* per lo studio del rilascio incidentale di gas in pressione a bordo di una piattaforma off-shore, capace di fornire dei risultati in termini di volume totale di gas rilasciato, volume di gas infiammabile rilasciato e le aree lambite dal gas.

Tra le ipotesi effettuate per lo studio di tale situazione, troviamo:

- rilascio da un foro in una pipeline;
- presenza di un ostacolo (un'altra pipeline) molto vicino;
- portata in uscita esclusivamente di CH4;
- rilascio nel deck di produzione della piattaforma;
- pavimentazione del deck di tipo plated, dunque impenetrabile al gas;
- presenza di vento;
- posizione del rilascio più sfavorevole possibile in base alle condizioni di vento (la nube investirà gran parte della piattaforma).

La difficoltà dello studio in questo caso specifico consiste nel fatto che una piattaforma off-shore è un impianto molto complesso e congestionato: numerosi componenti, tank e piping fanno sì che gli spazi a bordo della piattaforma siano caratterizzati da elevati gradienti di velocità e pressione.

Una simulazione CFD, in tale situazione, potrebbe presentare dei problemi di convergenza, oltre che al notevole costo computazionale richiesto. Infatti, il caso studio scelto ("scenario incidentale di rilascio di gas in pressione su una piattaforma off-shore") è composto da due fasi, fase di rilascio e fase di dispersione, con scale spaziali e temporali differenti. I classici approcci CFD prevedono l'applicazione di un approccio *"one step"*, ovvero con un'unica simulazione CFD si simulano entrambe le fasi di rilascio e dispersione, mentre l'approccio CFD innovativo proposto consiste in un approccio *"two steps"*: la fase di rilascio è caratterizzata da un getto sonico comprimibile, mentre la successiva fase di dispersione è caratterizzata da velocità dell'ordine dei 10 m/s e dunque si ha a che fare con un fluido incomprimibile. E' emerso da [28] che differenziare le due fasi, consente un risparmio del costo computazionale: dato che la fisica dei due fenomeni è differente, il setup da impostare sul software scelto per svolgere la relativa simulazione CFD potrebbe essere impostato di conseguenza. Separare le due fasi consente anche di impostare un diverso grado di finitura della mesh: la fase di rilascio è interessata da fenomeni fisici microscopici, e dunque una mesh fine sarebbe più appropriata; la fase di dispersione è invece caratterizzata da fenomeni macroscopici e dunque la finitura della mesh può essere più grossolana.

Il collegamento tra la fase di rilascio e la fase di dispersione è dato dal *coupling*: occorre far comunicare le due fasi in una maniera veloce, precisa e accurata. I dati di interesse del dominio della fase di rilascio devono essere estrapolati e dati come input alla successiva fase di dispersione. Il dominio interessato dalla fase di rilascio prende il nome di *"Source Box" (SB)*, e una volta compiuta la simulazione di rilascio supersonico nel dominio della SB, i suoi risultati potranno essere utilizzati per diverse simulazioni di dispersione, anche con configurazioni geometriche di piattaforme differenti, riducendo dunque i tempi di calcolo totali.

4.3. LA PIATTAFORMA DI RIFERIMENTO

La piattaforma di riferimento scelta e adottata nel lavoro di tesi [8], come già anticipato al Paragrafo 2.6, corrisponde a una piattaforma installata nelle acque poco profonde del Mar Adriatico, in quanto risulta essere la zona con la maggiore concentrazione di installazioni off-shore in Italia. La locazione della piattaforma è stata scelta in vicinanza delle stazioni meteorologiche di Ravenna Punta Marina e Ancona Boa, dalle quali è stato possibile ottenere i dati relativi alle distribuzioni di vento relative a tali zone.

Infatti, per simulare nel modo più accurato possibile un rilascio incidentale di gas in una piattaforma offshore, è stato necessario ricreare le condizioni ambientali che si avrebbero a bordo della piattaforma, e in particolare, il vento risulta essere uno dei principali parametri di influenza del fenomeno di diffusione a bordo della piattaforma.

In Figura 19 sono state riportate le distribuzioni della direzione del vento, con le velocità di riferimento.



Figura 19: Distribuzione del vento a Ravenna (a SX) e ad Ancona Boa (a DX) ([29] e [30])

Dalla Figura 19 si evince che la velocità media da considerare nella zona di interesse è compresa tra i 4 m/s e gli 8 m/s con la direzione del vento corrispondente a Nord-Ovest.

La scelta della piattaforma utilizzata per lo svolgimento delle simulazioni CFD è ricaduta su una piattaforma di produzione caratterizzata da una struttura emersa composta da tre deck: tra questi, è stato scelto il piano centrale, chiamato "Production Deck", per la fase di analisi. Il tipo di pavimentazione scelto corrisponde al tipo "*plated*", in quanto è la tipologia di pavimentazione più frequente tra gli impianti di estrazione di Gas Naturale. Infatti, dal punto di vista della sicurezza, è raccomandabile avere una separazione tra i deck della piattaforma al fine di evitare che il gas possa disperdere anche negli altri piani.

Il piano di produzione oggetto delle simulazioni CFD, realizzata tramite CAD, è riportato in Figura 20.



Figura 20: Piano della piattaforma oggetto delle analisi CFD svolte da [6], [7] e [8], su di esso si è basata la progettazione del mockup sperimentale; le forme geometriche visibili rappresentano gli ostacoli presenti a bordo della piattaforma

Su di esso è possibile notare la presenza di diversi solidi (cilindri e parallelepipedi), ovvero dei modelli 3D semplificati rappresentativi dei vari componenti presenti in un deck di produzione. In Figura 21 la lista dei componenti considerati da [7] e [8] con il dettaglio relativo alle dimensioni geometriche.

	Componente	Dimensioni [m]	Altezza [m]
Α	ELECTRICAL ROOM	5x12.5	5
В	HP COMPRESSOR SUCTION SCRUBBERS	φ=1	3.8
С	HP COMPRESSOR DISCHARGE SCRUBBERS	φ=1	3.8
D	OIL TREATER	4x1.5	1.6
E	LACT UNIT	4.5x2	2.5
F	PILLAR	1x1	5
G	DRY OIL TANK	1x3.5	1.5
н	PILLAR	1x1	5
T	PIG TRAPS	0.5x4	1.5
L	GAS FILTER SEPARATOR	φ=1	3.8
м	GLYCOL REGENERATOR	4x2.5	2.5
N	GLYCOL FILL PUMP	1.5x1.5	1.5
0	GLYCOL TANK	φ=1.5	3.8
Ρ	DIESEL FUEL STORAGE TANK	φ=1.5	3.8
Q	DIESEL FUEL STORAGE TANK	φ=1.5	3.8
R	POWER GENERATOR	1x3	2.8
S	POWER GENERATOR	1x2	2.8
т	SEPARATOR	1.5x4	2.3
U	SEPARATOR	1.5x4	2.3

Figura 21: Lista dei componenti presenti in piattaforma nel piano di interesse (Piano di produzione), considerati nelle simulazioni CFD da [6], [7] e [8]

Per quanto riguarda le dimensioni di riferimento del deck, si è considerata una piattaforma reale a struttura fissa le cui dimensioni principali sono riportate di seguito:

- Lunghezza: 30 m;
- Larghezza: 20 m;
- Spessore deck: 0.1 m;
- Distanza interdeck: 5 m;
- Lato piloni: 1 m.

4.4. IL CONCETTO DI SOURCE BOX

Come già anticipato al Paragrafo 4.2, il dominio in cui avviene la fase di rilascio e in cui si esauriscono gli effetti di comprimibilità del getto sonico prende nome di *"Source Box" (SB)* [4]. All'esterno di essa, il fluido può essere modellato come fluido incomprimibile.

Nel caso in esame, studiato inizialmente da [5], si è voluto simulare il rilascio di gas in pressione da una pipeline contenente metano, e poiché in una piattaforma off-shore è molto probabile trovare dei banchi di tubi disposti in parallelo, è stato studiato il caso di getto che impatta contro una tubazione vicina. La

forma della SB proposta è di tipo cubica, e la sua lunghezza caratteristica dipende dal diametro del foro di rilascio d e dalla pressione di rilascio P_0 secondo la formula proposta da [31]:

$$L_{SB} = 10 * 0,645 * d_{foro} * \sqrt{P_0}$$

La lunghezza caratteristica L_{SB} fornisce la distanza entro cui si possono considerare esauriti gli effetti di comprimibilità, e corrisponde a circa 10 volte la distanza in cui si forma il primo disco di Mach. I parametri caratterizzanti la SB, introdotti nel lavoro di tesi [6], sono stati ripresi da [8] e adottati nel seguente lavoro di tesi come vincoli di riferimento per la successiva progettazione del laboratorio sperimentale SEASTAR. Essi sono riassunti in Tabella 3.

Forma SB	Cubica
Lato SB	46 cm
Diametro foro	1 cm
Forma dell'ostacolo	Cilindrica
Diametro dell'ostacolo	10 cm
Distanza dell'ostacolo	10 cm
Direzione del getto	Perpendicolare all'asse dell'ostacolo
Pressione di rilascio	10 bar

Tabella 3: Caratteristiche della SB

Utilizzando delle immagini ottenute dalle simulazioni CFD sviluppate nel lavoro di tesi [6], si può vedere il rilascio da una tubazione contenente metano andare a colpire la tubazione adiacente (Figura 22), rappresentata dall'ostacolo cilindrico. Il dominio a valle dell'ugello di rilascio, comprendente l'ostacolo cilindrico, corrisponde al volume della SB ed è rappresentato in "rosso" in Figura 23.



Figura 22: Tubazione soggetta al rilascio incidentale di gas; il getto di gas va a impattare sulla tubazione adiacente, rappresentata come un ostacolo cilindrico [6]



Figura 23: Rappresentazione visiva della SB; tale dominio ha un'estensione "fisica" soltanto nella simulazione CFD; nella realtà progettuale tale dominio non dovrà essere realizzato, ma dovrà essere tenuto in considerazione per il posizionamento degli ostacoli in piattaforma [6]

La modellizzazione della fase di rilascio tramite il concetto di SB consente dunque di separare lo studio di rilascio da quello di dispersione a bordo della piattaforma: la SB rappresenta una "black box" dal punto di vista della fase di dispersione, in quanto i risultati derivanti dalla simulazione della sola fase di rilascio (come la distribuzione del gas metano sulle sue superfici) possono essere estrapolati e dati in input alla fase di dispersione. In Figura 24 si può apprezzare il posizionamento della SB sul modello di piattaforma proposto.



Figura 24: Posizionamento della SB sul deck di piattaforma utilizzata per le simulazioni CFD; tale posizione dipende dal punto in cui si vuole simulare il rilascio di gas incidentale; le forme geometriche visibili rappresentano gli ostacoli presenti a bordo della piattaforma [6]

Una volta ottenuti i risultati della fase di rilascio, si è potuto procedere con l'analisi della fase di dispersione, nel dominio rimanente della piattaforma, dalla quale si potrà ottenere la nube di gas coinvolta, come quella riportata come esempio in Figura 25.



Figura 25: Nube di gas in piattaforma [8]

Sfruttando l'idea di SB si potrà ottenere una libreria di casi di SB caratterizzate da parametri differenti, le quali, una volta sviluppate, potranno essere utilizzate all'occorrenza per lo studio della fase di dispersione in geometrie di piattaforme e condizioni climatiche differenti, ottenendo dunque un notevole risparmio di tempo legato al calcolo, in quanto non si andrebbe a simulare la fase di rilascio per ogni nuova simulazione.

4.5. RISULTATI E VALIDAZIONE DEL MODELLO CFD

I risultati ottenuti da [8] sul modello CFD innovativo basato sull'approccio two steps per il particolare caso di rilascio incidentale di gas in pressione a bordo di una piattaforma offshore hanno mostrato che:

- L'approccio two-steps permette di gestire meglio l'eterogeneità dei fenomeni fisici coinvolti, evitando, inoltre, il ricalcolo della fase di rilascio qualora occorresse analizzare un caso analogo per un dominio di dispersione differente;
- Il risultato finale della simulazione dipende fortemente dal grado di "accuratezza" con cui si forniscono i risultati della fase di rilascio alla fase successiva di dispersione, e si è giunti alla conclusione che occorre effettuare un coupling completo tra le due fasi, ovvero occorre estrapolare i profili continui dalla prima fase e darli come input alla seconda fase senza ricorre ad alcuna approssimazione.

A titolo di esempio sono state riportate due immagini rappresentative della tipologia di risultati ottenuti dalle simulazioni CFD condotte da [8] sul deck di produzione.



Figura 26: Rendering 3D rappresentativo della nube di gas che si forma in seguito al rilascio incidentale di gas nel Production Deck [8]



Figura 27: Campo di velocità nel Production Deck per le condizioni di vento adottate da [8]

Le grandezze che sono state prese a confronto per poter arrivare a tali risultati, sono:

- Frazione massica del gas rilasciato (CH4) a bordo della piattaforma;
- Campo di moto a bordo della piattaforma;
- Volume totale del gas rilasciato, volume infiammabile e area lambita.

Questi sono stati ritenuti da [8] come valori più significativi poiché, trattandosi di un caso di rilascio di gas, in cui si ha trasporto delle specie, è interessante capire come varia la quantità totale di metano rilasciata a livello globale, mentre a livello locale è interessante comprendere il campo di velocità ed il trasporto del metano.

Dunque, al fine di validar il modello CFD ibrido occorre che il laboratorio SEASTAR sia progettato per la:

- Rilevazione della concentrazione del gas scelto per lo studio sperimentale a bordo della piattaforma;
- Rilevazione del campo di moto a bordo della piattaforma.

Inoltre, poiché uno degli obiettivi del progetto è la creazione di un catalogo di source box caratterizzate da parametri differenti (come per esempio la pressione di rilascio, dimensione foro e tipologia di ostacolo), in modo da coprire un numero minimo indispensabile di casi rappresentativi delle situazioni incidentali più frequenti che si possono verificare in ambito Oil&Gas, una delle caratteristiche richieste dalla progettazione del mockup sarà la versatilità: dovrà essere possibile cambiare facilmente la disposizione e la configurazione della SB a bordo della piattaforma; Inoltre, in futuro, una volta compiuta la prima fase di validazione del modello CFD con la geometria utilizzata da [9], potrebbero essere previste ulteriori prove di simulazione CFD con diverse disposizioni di ingombri a bordo della piattaforma, i quali dunque, dovranno poter essere spostati agevolmente nel mockup sperimentale che si intende realizzare.

I dettagli della progettazione del mockup sperimentale saranno trattati al Paragrafo 5.4.

5. IL LABORATORIO SEASTAR

5.1. INTRODUZIONE AL LABORATORIO E ANALISI REQUISITI FUNZIONALI

Il presente capitolo ha per oggetto la descrizione generale del laboratorio sperimentale "SEASTAR", il cui scopo si ricorda essere la simulazione di scenari di rilascio incidentale di gas in pressione in impianti Oil&Gas offshore, e la sua progettazione, che si ricorda deve essere compiuta in maniera tale da poter confrontare i risultati ottenuti dall'implementazione di modelli CFD innovativi con i risultati derivanti dalla fase sperimentale. Infatti, per validare i risultati dei modelli CFD, è necessario condurre una campagna sperimentale riproponendo le stesse condizioni operative impostate nei modelli CFD e riprese al Capitolo 4. In questa maniera si potrà stabilire se effettivamente possono essere utilizzati come una valida alternativa a quanto già presente nel settore. Le grandezze alle quali si è interessati per la validazione dei modelli CFD sono:

- Concentrazione del gas scelto per lo studio sperimentale a bordo della piattaforma;
- Campo di moto a bordo della piattaforma.

Il laboratorio, dunque, sarà progettato per la misurazione delle grandezze appena citate, e in particolare dovrà soddisfare i seguenti requisiti funzionali:

- a. Ricreare un ambiente di prova che simuli le condizioni ambientali in cui si trova a lavorare un impianto di estrazione offshore reale in mare aperto, tramite la realizzazione di una galleria del vento nella quale viene ricreato il flusso di vento considerato nelle simulazioni CFD da validare, e che risulti essere omogeneo ed esteso a sufficienza in maniera tale da tenere lontani gli effetti di bordo dal mockup sperimentale, con una velocità di imbocco sul deck della piattaforma pari a 6 m/s;
- b. Ospitare una struttura il più possibile fedele al modello di piattaforma utilizzato nelle simulazioni CFD, le cui dimensioni di riferimento (2 m * 3 m), opportunamente scalate (il rapporto di scala individuato da [10] è 1:10) sono state prese analizzando il parco italiano di piattaforme offshore; il mockup sarà posizionato all'interno della galleria in modo da essere investito totalmente dal flusso di vento generato, e sarà posizionato su una base rotabile affinché, tramite semplice rotazione della base, possano essere simulate differenti direzioni del vento;

- c. Simulare il rilascio di gas tramite un sistema di distribuzione di gas, il quale consente il trasporto di gas dalla zona prevista per lo stoccaggio delle bombole fino al modello della piattaforma presente nella camera di prova, tramite delle tubazioni e sostenendone il rilascio per tutta la durata degli esperimenti (il rilascio avverrà tramite un ugello di rilascio il cui diametro massimo è pari a 1 cm, con una pressione di rilascio massima pari a 10 bar e per una durata totale di 60 s, tempo di riferimento per l'attivazione del sistema d'emergenza [10]);
- d. Raccolta risultati delle prove sperimentali, tramite un opportuno apparato di sensoristica, il cui scopo è il confronto dei dati raccolti con i risultati ottenuti dalle simulazioni CFD (si è dunque interessati a valori di concentrazione di gas, campi di moto e di pressione); è prevista anche la creazione di una sala di controllo, la quale ha il ruolo di monitorare e controllare il processo.

La definizione dei requisiti funzionali e operativi del Lab SEASTAR, necessaria all'individuazione dei sistemi e degli apparati necessari al raggiungimento dello scopo preposto, è stata il primo passo su cui si è basata la successiva fase di progettazione. In particolare, la progettazione trattata con il presente lavoro di tesi ha riguardato:

- Descrizione degli spazi a disposizione del laboratorio;
- Verifica del rispetto dei vincoli funzionali e operativi della galleria del vento da realizzare all'interno del laboratorio SEASTAR in seguito alla progettazione fluidodinamica proposta dal DIMEAS;
- Scelta e descrizione del modello "mockup" della piattaforma, basato sulla geometria impostate nelle simulazioni CFD [8] e successiva progettazione;
- Brevi cenni sul sistema di distribuzione di gas (attualmente in fase di definizione);
- Riferimenti alla parte di sensoristica, elettronica a servizio delle prove sperimentali, acquisizione e analisi dati (attualmente in fase di definizione);
- Spiegazione della modalità di conduzione delle prove sperimentali.

Si anticipa che i punti relativi al sistema di distribuzione di gas, alla sensoristica, all'elettronica a servizio delle prove sperimentali, all'acquisizione e analisi dati non sono trattati interamente all'interno di questo elaborato di tesi in quanto non completamente definiti al momento della stesura del testo.

Si ricorda che uno degli obiettivi di tale elaborato di tesi è contribuire alla stesura di un documento di progetto riguardante la progettazione definitiva del laboratorio sperimentale, la quale, una volta ultimata,

sarà ripresa dal costruttore incaricato della realizzazione del laboratorio provvedendo alla stesura del progetto esecutivo.

5.2. SPAZI A DISPOSIZIONE

Gli spazi che sono stati messi a disposizione per la realizzazione del laboratorio SEASTAR si trovano presso l'area "Laboratori" del parco scientifico-tecnologico "Environment Park". Essi si sviluppano su due livelli, e sono così ripartiti:

- Livello 1 → Locali da destinare alla realizzazione della galleria del vento, e ad ospitare il mockup sperimentale;
- Livello 2 → Locale da destinare alla sala di controllo dell'intero laboratorio sperimentale.

In particolare, sono stati assegnati i locali rappresentati in Figura 28 per quanto riguarda il livello 1 del laboratorio e il locale rappresentato in Figura 29 per quanto riguarda il livello 2 del laboratorio.



Figura 28: planimetria locali "livello 1"



Figura 29: Planimetria locali "livello 2"; la zona prevista per ospitare la sala controllo è colorato in blu, anche se verrà modificata in quanto il vano scale verrà smantellato e spostato lungo il corridoio A1_L_110a; è prevista anche un'apertura che dalla sala di controllo consentirà di visionare la fase sperimentale che avverrà al livello 1

In Tabella 4 sono riportate le indicazioni circa le superfici e le altezze a disposizione per la progettazione del laboratorio.

Dimensioni l laboratorio SE	locali ASTA	R
Area livello 1	m ²	257
Altezza livello 1 A1_L_110a' A1_L_110b	m	3,6
Altezza livello 1 A1_L_110a" A1_L_110c A1_L_110d A1_L_110e	m	9,35
Area livello 2	m ²	58

Tabella 4: dimensioni degli spazi da destinare al laboratorio SEASTAR

Per la realizzazione della galleria del vento sono previste delle modifiche strutturali alla pre-esistente struttura dei locali. Tali modifiche saranno analizzate nel dettaglio nel paragrafo relativo alla

progettazione fluidodinamica della galleria del vento (Paragrafo 5.3), in quanto tra le scelte progettuali che hanno portato alla definizione del lay-out della galleria del vento si sono considerati i vincoli imposti dalla struttura dei locali.

5.3. PROGETTAZIONE FLUIDODINAMICA DELLA GALLERIA DEL VENTO

5.3.1. Introduzione alla galleria del vento

La galleria del vento è uno strumento fondamentale per effettuare simulazioni sperimentali su modelli in scala dei sistemi sui quali si vuole studiare la fluidodinamica. La progettazione fluidodinamica della galleria del vento è stata realizzata considerando come punto di partenza il lavoro di progettazione preliminare realizzato da [9], con l'aggiunta di qualche modifica, dettata dalla necessità di dover rispettare i vincoli funzionali, riguardanti per esempio l'uniformità e l'estensione del flusso di vento generato, la cui velocità all'imbocco del mockup deve essere pari a 6 m/s, e la potenza elettrica massima installabile pari a 70 kW. La proposta progettuale e lo studio della fluidodinamica della galleria del vento sono stati realizzati dal DIMEAS, la cui esperienza nel campo delle gallerie del vento ha permesso il raggiungimento dei requisiti voluti; in tale lavoro di tesi si è voluto verificare il lavoro svolto dal DIMEAS, ricorrendo all'uso di un diverso software per simulazioni CFD ("ANSYS Fluent") e confrontando i risultati di uniformità del campo di vento generato.

5.3.2. Requisiti funzionali e vincoli strutturali

Per la progettazione fluidodinamica della galleria del vento si è partiti dall'identificazione dei requisiti funzionali che devono essere rispettati. Tali requisiti, con riferimento alle dimensioni dei locali messi a disposizione (Paragrafo 5.2), possono essere così riassunti:

Per simulare nel modo più accurato possibile un rilascio incidentale di gas in una piattaforma offshore, è necessario ricreare le condizioni ambientali che si avrebbero a bordo della piattaforma. Tra i parametri che si è scelto di riproporre, il vento risulta esserne uno dei principali driver del fenomeno di diffusione a bordo della piattaforma. La velocità del vento considerata da [8] è uguale a 6 m/s, dunque tale parametro dovrà essere utilizzato come riferimento per la progettazione fluidodinamica della galleria del vento, cercando di realizzare un flusso di vento il più possibile uniforme in camera di prova, poiché in essa troverà alloggio il mockup sperimentale; l'estensione della zona di prova deve essere tale da ridurre al minimo l'influenza delle pareti del laboratorio sull'uniformità del flusso all'imbocco del deck di piattaforma. Si segnala che, in futuro, potrebbe essere interessante avere dei range di velocità variabili al fine di poter utilizzare il laboratorio SEASTAR anche per altri studi sperimentali con differenti setup di condizioni al contorno e per questo motivo la progettazione fluidodinamica eseguita dal DIMEAS prevede un range di velocità variabile in camera di prova compreso nel range 4 - 10 m/s; il vincolo di velocità è dovuto alla potenza elettrica massima installabile prevista dal contratto di fornitura attuale.

- Realizzazione di una camera di prova del tipo tre quarti a getto libero avente dimensioni trasversali utili pari a 6,4 m * 2,5 m e lunghezza di circa 8,0 m, le cui dimensioni sono state valutate in maniera tale che, una volta allestito il mockup sperimentale nella posizione individuata per la conduzione della prova sperimentale, sia a sufficiente distanza dalle pareti della camera per ridurre al minimo gli effetti di bordo e di non uniformità del flusso; la scelta di tali dimensioni è stata anche dettata dalla necessità di limitare la potenza elettrica richiesta in relazione a quella disponibile che si aggira attorno a 70kW.

Tenendo in conto dei limiti imposti dalla pre-esistente struttura, si è deciso, dunque, di realizzare una galleria del vento così strutturata:

- <u>Condotto convergente</u> da posizionare in parte dei locali A1_L_110a e A1_L_110b, in depressione rispetto all'ambiente esterno in modo che provvigioni l'aria da utilizzare in camera di prova.
- <u>Camera di prova</u>, posizionata a valle del condotto convergente, deve essere attraversata da un flusso di vento uniforme, in corrispondenza del quale troverà alloggio il mockup sperimentale;
- <u>Condotto divergente</u>, posizionato a valle della camera di prova, necessario per ottenere il recupero di pressione necessario
- *Vano ventole*, il quale ospiterà le ventole poste all'uscita del condotto divergente e che metteranno in movimento l'aria della galleria del vento;
- <u>Camera di rotazione e finestra</u> sul cavedio, necessari a convogliare il flusso di vento a valle del vano ventole verso il camino esterno, rappresentato dal cavedio confinante con il localeA1_L_11e

In seguito ai sopralluoghi effettuati nei luoghi assegnati per la futura costruzione del laboratorio SEASTAR, di cui si è già discusso al Paragrafo 5.2, le modifiche strutturali, richieste al fin di poter conseguire la realizzazione della galleria del vento possono essere riassunte con riferimento alla figura Figura 30:

- Abbattimento dei tramezzi tra i locali A1_L_110a-b, A1_L_110c-d e A1_L_110d-e, al fine di poter ottenere la camera di prova desiderata;

- Realizzazione di un'apertura nella parete perimetrale confinante con il passo carraio di dimensioni 6,4 * 3,6 m (le dimensioni sono dettate dalla presenza della porta anti panico di ingresso dal passo carraio esterno al laboratorio al locale A1_L_110a da un lato, mentre dall'altro lato vi è la presenza di un pilastro portante), con l'obiettivo di realizzare il condotto convergente per la galleria del vento, tramite il quale verrà convogliata l'aria presa dall'ambiente esterno (passo carraio) verso la camera di prova, e dunque il mockup sperimentale;
- Spostamento delle scale adiacenti al tramezzo tra i locali A1_L_110a e A1_L_110b, in maniera tale da poter allargare la zona che ospiterà il condotto convergente della camera del vento;
- Realizzazione di un'apertura nel tramezzo tra i locali A1_L_110b-c di dimensioni 6,4 * 2,5 m, al fine di poter realizzare l'uscita del condotto convergente verso gli spazi destinati alla realizzazione della camera di prova (le dimensioni in altezza sono dettate dalla presenza della trave relativa al Livello 2, mentre in larghezza si vuole ottenere un flusso abbastanza "grande", compatibilmente con i vincoli geometrici, per i motivi spiegati a inizio paragrafo);
- Apertura di una finestra tra il locale A1_L_110e ed il confinante cavedio, tramite la quale avverrà la fuoriuscita dell'aria introdotta in galleria del vento;
- Sigillatura delle porte di comunicazione tra i locali A1_L_110c-d-e ed il corridoio del locale A1_L_110a.



Figura 30: Pianta dei locali appartenenti al Livello 1 e relative opere strutturali da compiere per la realizzazione della galleria del vento

Per la realizzazione del CAD relativo al lay-out della galleria del vento che si vuole realizzare presso il laboratorio SEASTAR si è utilizzato il software SOLIDWORKS. La forma e le dimensioni della galleria sono mostrate in Figura 31 e in Figura 32.

Nei paragrafi successivi le dimensioni dei diversi ambienti sono definite in dettaglio.



Figura 31: A SX vista laterale e dell'alto della galleria del vento con relative quote; a DX l'assonometria della camera del vento (le misure sono espresse in metri)



Figura 32: Sezione A-A rappresentante il dettaglio relativo alla finestra sul cavedio (le misure sono espresse in metri)

Il lavoro della progettazione fluidodinamica della galleria del vento si è avvalso della collaborazione del team del DIMEAS per la definizione dei dettagli strutturali della galleria, di seguito elencati.

5.3.3. Elementi della galleria del vento

5.3.3.1. Condotto convergente

Il condotto convergente ha una lunghezza complessiva di 6,0 m a partire dalla parte esterna della parete che confina con il passo carraio. L'ingresso del condotto convergente prevede un'apertura rettangolare larga 6,40 m e alta 3,60 m, per una superficie di ingresso pari a 23,04 m². È importante che l'asse longitudinale del condotto convergente sia allineato con il rispettivo asse longitudinale della camera di prova, in maniera tale che il flusso di vento uscente dal condotto convergente abbia la componente dominante della velocità parallela all'asse di sviluppo della galleria.

L'uscita del condotto convergente ha sezione rettangolare, con larghezza 6,40 m e altezza 2,5 m, per una sezione uscita pari a 16 m². Il convergente ha quindi rapporto di contrazione 1,44.

La parete superiore del condotto convergente è formata da:

a) un tratto iniziale orizzontale posto ad un'altezza di 3,6 m e lungo 1,2 m misurati a partire dalla parete esterna che si affaccia sul passo carraio;

 b) un tratto curvo composto da due cubiche che si estendono ciascuna per una lunghezza di 2,3 m di equazione indicata in Figura 33

$$1.1 \left[1.0 - 4 \left[\frac{(x-1.2)}{4.6} \right]^3 \right] + 2.5 \quad per \quad 1.2 \text{ m} < x < 3.5 \text{ m}$$
$$1.1 \left[4 \left[1 - \frac{(x-1.2)}{4.6} \right]^3 \right] + 2.5 \quad per \quad 3.5 \text{ m} < x < 5.8 \text{ m}$$

Figura 33: Equazione della cubica adottata per la realizzazione del condotto convergente

dove l'origine x = 0,0 m coincide con l'inizio del condotto; questa parte termina esattamente contro la parete che delimita i locali A1_L_110b e A1_L_110c;

c) un tratto finale orizzontale posto ad un'altezza di 2,5 m e lungo 0,20 m, che in realtà coincide con il muro che divide i locali A1_L_110b e A1_L_110c.

5.3.3.2. Camera di prova

La camera di prova si svilupperà per una lunghezza complessiva pari a circa 8 m. Si è deciso di sigillare opportunamente le porte che si affacciano sul locale A1_L_110a per evitare che vi siano dei possibili passaggi per l'aria in quanto, trovandosi la camera in depressione rispetto all'ambiente esterno, potrebbero verificarsi degli ingressi non voluti di aria che potrebbero influenzare il flusso di vento generato all'interno della camera. Dal Livello 2 è prevista l'apertura di una finestra, da sigillare opportunamente, che possa consentire l'osservazione della camera di prova dalla sala di controllo durante lo svolgimento delle prove sperimentali.

5.3.3.3. Condotto divergente

Il condotto divergente occupa parte dei locali A1_L_110d e A1_L_110e. Il divergente è ampio quanto i locali ed è lungo 4,0 m, oltre ad un tratto iniziale di invito di seguito descritto. Il soffitto del condotto divergente è costituito da un tratto iniziale ad arco di cerchio ampio 55° con raggio di curvatura di 0,4 m, seguito da una parete piana inclinata di circa 3.576° rispetto al suolo che si estende per 4,0 m (proiezione sul suolo). La distanza tra l'inizio della parete piana del condotto divergente e l'inizio della

camera di prova è pari a 8,0 m. La parete piana del divergente parte da un'altezza di 3,0 m e termina ad un'altezza di 3,25 m.

5.3.3.4. Vano ventole

I motori aspiranti si trovano subito dopo il condotto divergente, in un alloggiamento alto 3,25 m e lungo 1,0 m, largo quanto la camera A1_L_110e e chiuso in alto da un soffitto piano parallelo al suolo. Sono state prese come riferimento delle ventole assiali intubate prodotte dalla azienda "*INFINAIR*" indicate in Figura 34. Queste ventole intubate hanno un ingombro complessivo di 1,23 m in larghezza per 1,36 m in altezza per 0,85 m in profondità. Per coprire un'area significativa della sezione di uscita del condotto divergente sono complessivamente necessarie 10 ventole, da schierare in due file sovrapposte da 5 ventole ciascuna. Lo spazio tra le ventole dovrà essere sigillato in modo da evitare ritorni di flusso a monte delle ventole. Ciascuna ventola pesa 288 kg con una potenza massima assorbita dai motori pari a 75 kW. Le sezioni di ingresso delle ventole rimane uno spazio di circa 0,15 m prima che il flusso entri nella camera successiva.



Product Feature

Sailfish series cast aluminum axial impeller with airfoil type blade to

Variable angle blade axial impeller make selection more accurate, Balance quality grade up to G2.5 (AMCA 204) to reduce the noise and ubbridge axial more accurate.

and vibration. Epoxy powder coating, corrosion and rust-proof, Direct drive, no wearing parts and maintenance-free.



Oty.: 10

Mark: MARK0001 No.: 1

Performa	nce							Mod	el: YFIAD	-1120D6/25	5-6-7.5-GT
Vol. Airflow	Total Pre	ssure	Static F	Pressure	Fan Speed	Shaft Power	Sound	Insula	nted N	Weight	Surface Treatment
m3/h	Pa			Pa	r/min	kW	dB(A)	dB(A)	kg	
54347	344		2	03	960	6.748	76	76	5	288	Epoxy
Motor Info)										
Motor Power	RPM	Po	oles	Power Supp	RC/LRC	Туре	IP Class	MEG	Exp. Class	Cooling Method	Frequency Range

Motor P	ower	RPM		Poles	Power S	iupply	RCARC	Тур	• IP	Class	MEG	Exp. Class	Cooling Method	Frequency Range
7.5k	w	960		6	380/5	0/3	17A/109	TEF	c	IP55	IE2		IC410	
Soun	d Dat	а									Applicatio	n Conditio	n	
1	2	3	4	5	6	7	8	LwA	dBA	ר ב	Startup	Operation	Altitude	Density

2	99	76	Temp.	Temp.	Altro
.5m	(5 ft) from th	e	20℃	20°C	0m
	(,		Selected /	Accessorie	es

 1
 2
 3
 4
 5
 6
 7
 8
 LwA

 84
 88
 92
 83
 81
 78
 70
 63
 88

 * dBA rating is based on measured LwA at a distance of 1.5m (5 ft) from th acoustic center of the fan in a hemispherical free field.
 * Ratings do not include the effects of acoustic accessories and duct end correction.

Performance Curve

YEIAD-112006/25-8-7.5-0T





25 deg wheel Collapsible Plywood-crate (Fumigation-free)(inquiry for spare component packing)

1.2 kg/m3



5.3.3.5. Camera di rotazione del flusso

A valle del vano ventole ed in comunicazione con esso deve essere realizzato un ambiente nel quale il flusso venga deviato verso l'alto in preparazione all'uscita dal cavedio. Tale ambiente comunica con il resto dell'impianto che si trova a monte solo attraverso la sezione di uscita del vano ventole. È quindi necessario realizzare a valle del vano ventole un'ampia parete verticale di dimensioni pari al locale A1_L_110e e alta fino al soffitto, opportunamente sigillata in modo da evitare il passaggio di aria da e verso altri locali. Tale parete verticale sarà collegata alla parete orizzontale che chiude il vano ventole da un raccordo ad arco di cerchio ampio 90° e di raggio pari a 0,4 m, anch'esso profondo quanto il locale A1_L_110e. Per facilitare la rotazione di 90° del flusso, dovranno essere realizzate tre superfici di deflessione costituite da archi di cerchio ampi 90° e poste sotto la schiera di ventole inferiore, sopra la schiera di ventole superiore e tra le due schiere di ventole.

L'uscita del flusso nel cavedio avverrà attraverso un'apertura rettangolare posta a 4,5 m dal suolo, alta fino al soffitto e larga 2,2 m, posizionata a ridosso dell'ultima colonna del locale A1_L_110e (Figura 32).

5.3.4. Simulazione CFD del campo di moto nella galleria del vento

5.3.4.1. Cenni sulla fluidodinamica computazionale (CFD) e workflow

La fluidodinamica computazionale, da qui in avanti chiamata CFD (Computational fluid dynamics), consente di esplorare il comportamento dei fluidi in moto in geometrie complesse, difficilmente replicabili nella realtà, ricorrendo a dei metodi di analisi numerica. Con questo approccio si è in grado di valutare delle grandezze di riferimento, relative a un determinato progetto o calcolo, riducendo i tempi complessivi di progetto con dei costi economici essenzialmente contenuti. Le limitazioni di un'analisi CFD dipendono dalla validazione di una determinata simulazione e dalle prestazioni di calcolo della macchina sulla quale vengono effettuate le simulazioni.

Le leggi fondamentali sulle quali si basa la CFD appartengono alla macro-area della meccanica dei fluidi: la legge di conservazione della massa, la conservazione dell'energia e la conservazione della quantità di moto costituiscono un sistema di equazioni differenziali non lineari (equazioni di Navier-Stokes) non risolvibile in maniera analitica per sistemi fisici complessi. Il ruolo della CFD consiste dunque nel modellizzare i fenomeni di interesse per un particolare fluido in moto, risolvendo le equazioni in maniera approssimata ricorrendo all'analisi numerica, cercando di ottenere un livello di accuratezza dei risultati elevato con un tempo di calcolo accettabile.

Tra gli approcci possibili per una simulazione CFD si riportano [32]:

• Direct Numerical Simulation (DNS): è l'approccio concettualmente più semplice ma anche il più oneroso dal punto di vista del costo computazionale in quanto le equazioni vengono discretizzate "direttamente", ovvero non vi è nessun processo di approssimazione delle equazioni;

• LES (Large Eddy Simulation): con questo approccio vengono risolti in maniera esatta i moti del fluido caratterizzati da "scale" spaziali e temporali più ampie, in quanto sono più energetici rispetto alle scale minori, che dunque contibuiscono in minor parte al trasporto di energia e di materia;

• RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes): è l'approccio che permette di stimare accuratamente le grandezze di interesse di fenomeni turbolenti complessi, con un modesto costo computazionale; esso si basa sulla scomposizione delle quantità turbolente in due parti, ovvero una media riferita a un particolare arco di tempo, e una fluttuante; tra questi rientrano i modelli: Spalart-Allmaras (modello a una equazione), k- ε e k- ω (modelli a due equazioni).

L'approccio RANS è l'approccio scelto in questo lavoro di tesi in quanto rappresenta il giusto compromesso tra accuratezza richiesta a costo computazionale. In particolare, si è scelto il modello a due equazioni SST k- ω in quanto presenta della caratteristiche ibride tra i modelli k- ε (usato storicamente per la sua robustezza e accuratezza per un range di flussi turbolenti abbastanza ampio) e k- ω (usato per predire con buona accuratezza la separazione del boundary layer). Tali modelli a due equazioni prevedono, infatti, l'utilizzo di due equazioni di trasporto aggiuntive, necessarie per calcolare due quantità di turbolenza utilizzate nella risoluzione delle equazioni di Navier-Stokes: Esse risultano essere: energia cinetica turbolenta (k), rateo di dissipazione dell'energia turbolenta (ε) e velocità di dissipazione specifica (ω). Inoltre, viene raccomandato l'utilizzo di tale modello all'interno della guida del software utilizzato per lo svolgimento delle simulazioni CFD: ANSYS Fluent [33]. ANSYS Fluent è un software di simulazione CFD molto diffuso in ambito accademico ed industriale, dopo l'acquisizione di Fluent da parte di ANSYS Inc. il software fluidodinamico è stato integrato nell'ambiente ANSYS Workbench garantendo un interfacciamento molto buono con altri strumenti quali CAD e altri di analisi delle strutture. Fluent consente di processare in maniera efficiente qualsiasi tipo di flusso (sia incomprimibile che comprimibile), sia per casi stazionari che transitori.

Il flusso di lavoro richiesto dall'utilizzo del software ANSYS Fluent è composto da diversi step, collegati tra loro "in sequenza", come visibile in Figura 35.



Figura 35: Workflow su cui si basa una simulazione CFD con il solutore "Fluent"; "Design Modeler", "Meshing" e "FLUENT" sono gestiti da una piattaforma comune "ANSYS WORKBENCH"

I diversi step che costituiscono il flusso di lavoro su cui si basa una simulazione CFD tramite il solutore "FLUENT", saranno analizzati al paragrafo successivo.

5.3.4.2. Simulazione fluidodinamica della galleria del vento

Il primo step consiste nella preparazione della geometria destinata alla simulazione tramite l'ambiente di disegno integrato "Design Modeler": esso consente la creazione della geometria o l'eventuale modifica, se si possiede una geometria importata da programmi CAD esterni, per prepararla alla successiva fase di meshing.

Nel caso in esame, la geometria della galleria del vento realizzata su SOLIDWORKS è stata importata come file ".STEP" all'interno dell'ambiente ANSYS Workbench.



Figura 36:Geometria della galleria del vento impostata come tipo "Fluid"

Una volta importata la geometria della galleria del vento nel Workbench di ANSYS, si è utilizzato il DesignModeler per effettuare delle modifiche alla geometria, di preparazione alla seguenti fasi di Meshing e Setup. Come prima operazione, è stato impostato il tipo di solido importato. La geometria importata è, di default, di tipo "Solid", dunque si è cambiata la tipologia in "Fluid", in maniera tale da rendere tutto il volume della geometria importata coincidente con il volume che occuperebbe il fluido (aria) nella galleria del vento. In aggiunta, sono stati generati:

- 10 "Fan" Solid body, ovvero dei "Body" attivi, utilizzati in corrispondenza dell'alloggiamento previsto per le ventole individuate al Paragrafo 5.3.3.4, necessari per distinguere le due zone di fluido a monte e a valle del banco ventilatori (Figura 37);
- 1 operazione booleana di sottrazione, con cui l'intera zona della galleria del vento è stata
 "separata" in due zone differenti, separate dai "Fan" (Figura 38 e Figura 39);
- 4 Solid Body, impostati come "Frozen", risultanti dunque immuni a qualsiasi operazione di modellazione successiva, il cui unico scopo è quello di predisporre dei volumi, all'interno del dominio totale, da utilizzare nella successiva fase di meshing (Figura 40).



Figura 37: "Fan" Solid Body



Figura 38: Corpo 1 risultante dall'operazione booleana di sottrazione tra il volume totale della galleria e il Fan Body



Figura 39: Corpo 2 risultante dall'operazione booleana di sottrazione tra il volume totale della galleria e il Fan Body



Figura 40: I solid body generati sono stati piazzati in corrispondenza:del condotto convergente (Body 1); della zona in cui si vuole generare il flusso di vento uniforme in camera di prova (Body 2); del vano ventole e dei deflettori (Body 3); della parte superiore della camera di rotazione fino al camino esterno (Body 4)

Il passo successivo nel flusso di lavoro consiste nel "Meshing": per risolvere le equazioni di Navier-Stokes in maniera approssimata, occorre discretizzare le equazioni in equazioni algebriche definite per ogni nodo della griglia di calcolo utilizzata (Mesh). Il software scelto ANSYS Fluent si basa sulla discretizzazione del dominio di calcolo a "volumi finiti", ovvero l'intero dominio viene diviso in una serie di volumi di controllo sui quali vengono calcolate le equazioni di conservazione precedentemente citate. ANSYS Fluent una tipologia di mesh "non strutturata", in cui i volumi possono essere esaedri, tetraedri, poliedri, prismi e piramidi, e inoltre possono essere usate diverse combinazioni di mesh differenti per riprodurre geometrie complesse che richiederebbero la presenza di una mesh molto flessibile.

Nel caso in esame, si è voluta creare una mesh opportunamente rifinita nelle zone interne più critiche (come la zona dei ventilatori e dei deflettori), assegnando una mesh più grossolana per le zone poco interessate dal campo di moto del vento, come la parte superiore della camera di prova. Si è intervenuti, dunque, sulle condizioni di mesh globali e si sono definiti dei "Body Sizing" sui 4 body definiti all'interno del "DesignModeler". Si è anche applicato un "Face Sizing" in corrispondenza della faccia rappresentante il cavedio di uscita (al fine di ottenere una mesh rifinita in tale zona) e un "Inflation Layer" confinante con il suolo della camera del vento, ovvero una zona con una mesh a geometria rettangolare in modo da riuscire a catturare gli effetti del boundary layer che si genera, essendo di rilevanza per l'analisi del campo di vento che si andrebbe a generare in camera di prova. Si ricorda che uno dei requisti funzionali della galleria del vento è per l'appunto l'uniformità del flusso di vento generato. Le impostazioni utilizzate sono riportate in Tabella 5.

	Size function	Max face size [m]	Element size [m]
Global	Curvature		0,6
Body 1	Curvature	0,2	
Body 2	Uniform	0,2	
Body 3	Curvature	0,1	
Body 4	Curvature	0,2	
Face Sizing sul tetto cavedio	Uniform	0,2	

La mesh ottenute, e le statistiche riguardanti la mesh stessa, sono di seguito riportate.



Figura 41: Vista isometrica della mesh generata; in prossimità dei ventilatori e dei deflettori la mesh è stata ulteriormente infittita



Figura 42: Vista laterale della mesh generata

Statistics	
Nodes	502098
Elements	2563102

Figura 43: Numero di nodi e elementi generati per la simulazione svolta



Figura 44: Dettaglio riguardante l'inflation layer applicato in prossimità del suolo della galleria del vento

Una volta definita la mesh, si è passati alla definizione del "Setup and Solution", all'interno del quale sono stati definiti i seguenti parametri:

 "General" ovvero i parametri generali del solver, impostando una simulazione di tipo "Steady Pressure-Based", dato che si è interessati al campo di vento generato all'interno della galleria del vento quando i ventilatori sono a regime (per le velocità in gioco relativamente basse, l'aria è stata considerata come fluido incomprimibile, e dunque la scelta di un solver "Pressure-Based" risulta più che appropriata);

Display olver ype Velocity Formul Pressure-Based Absolute	ation
Solver Type Velocity Formul Pressure-Based Absolute	ation
Type Velocity Formul Pressure-Based Absolute	ation
Pressure-Based Absolute	
○ Density-Based ○ Relative	
Time	
 Steady 	
Transient	

Figura 45: Impostazione dei parametri generali del solver "FLUENT"
- "Models", ovvero i modelli risolutivi che andranno a definire la soluzione finale; nel caso in esame, come precedentemente anticipato, poiché si ha a che fare con un problema di natura esclusivamente fluidodinamica in cui l'unico fluido presente è l'aria, è stato adottato il modello SST k- ω poiché capace di combinare la forza del modello "k- ω " nell'analizzare gli effetti di bordo (senza l'utilizzo delle wall function) e la forza del modello "k- ε " per gli effetti di core lontani dalle strutture o dalle pareti. L'impostazione dei vari parametri è visibile in Figura 46.

Viscous Model		×			
Model	Model Constants				
○ Inviscid	Alpha*_inf	^			
O Laminar	1				
O Spalart-Alimaras (1 eqn)	Alpha_inf				
() k-epsilon (2 eqn)	0.52				
Transition k-k-omena (3 eon)	Beta*_inf				
O Transition SST (4 eqn)	0.09				
O Reynolds Stress (7 eqn)	a1				
O Scale-Adaptive Simulation (SAS)	0.31				
O Detached Eddy Simulation (DES)	Beta_i (Inner)				
Large Eddy Simulation (LES)	0.075				
O Standard O BSL SST	User-Defined Functions Turbulent Viscosity none				
k-omega Options	Prandtl Numbers				
Low-Re Corrections	Energy Prandtl Number				
0.1	none 👻				
Viscous Heating	Wall Prandtl Number				
	none				
Production Kato-Launder Production Limiter Intermittency Transition Model					

Figura 46: Modelli risolutivi adottati

- Boundary Conditions, riassunte in Tabella 6 e applicate in corrispondenza delle regioni identificate in Figura 47.



Tabella 6: Boundary conditions applicateTabella 6

Figura 47: Rappresentazione delle zone in cui sono state applicate le boundary conditions; "Inlet" in corrispondenza dell'ingresso del condotto convergente; "10 Fans" in corrispondenza alla zona in cui verranno installate le 10 ventole scelte; "Outlet" in corrispondenza della superficie esterna del cavedio

Per chiarire la scelta di tali Boundary conditions, è utile distinguere tre tipi di pressione:

- Pressione statica, ovvero la pressione esercitata dal fluido sulle pareti della condotta o del recipiente in cui è contenuto; essa agisce ugualmente in tutte le direzioni ed è indipendente dalla velocità del fluido;
- Pressione dinamica, ovvero la pressione corrispondente alla parte di energia posseduta dall'unità di massa del fluido a causa della sua velocità (energia cinetica); essa è funzione della velocità e della densità del fluido ed è espressa dalla seguente formula

$$p_d = \frac{1}{2} * \rho * v^2$$

Dove:

 p_d è la pressione dinamica [*Pa*].

 ρ è la densità del fluido [kg/m^3] (si è considerata una densità media dell'aria pari a 1,225 kg/m^3); v è la velocità del fluido [m/s].

- La pressione totale definita come somma algebrica di pressione dinamica e pressione statica.

I due valori di "Pressure Inlet" e "Pressure Outlet" si riferiscono alle condizioni di riferimento, impostate di default pari alla pressione atmosferica (101325 Pa), e sono dei valori di pressione statica.

Il valore di "Pressure Jump" inserito per la Boundary condition "Fan" si riferisce a un valore di pressione dinamica, ed è stato determinato in seguito a un approccio iterativo basato sul seguente algoritmo:

- È stata fatta variare la portata gestita dal singolo ventilatore, in relazione alla curva di potenza del ventilatore, indicata in Figura 34;
- È stata calcolata la velocità del fluido passante per il singolo ventilatore, assumendo la conservazione della quantità di massa, come

$$v = \frac{G}{A_{fan}}$$

dove v è la velocità del fluido [m/s]; G è la portata volumetrica [m³/s] trattata dal singolo ventilatore e A_{fan} è l'area di passaggio del fluido nel singolo ventilatore [m²], ottenuta dai dati tecnici riportati in Figura 47;

- Si è calcolata la Pressione Dinamica sulla regione "interior" dei fan come precedentemente definita;
- o Svolgimento simulazione e confronto risultati

Il valore dato per la "Fan Pressure Jump" boundary condition garantisce il salto di pressione necessario a instaurare il campo di moto voluto. Si ricorda che si vuole ottenere una velocità del vento in camera di prova pari a 6 m/s, garantendo anche una zona estesa di flusso uniforme.

Per ultimo, si è impostato lo schema di discretizzazione spaziale, riportato in Figura 48.

Solution Methods Pressure-Velocity Coupling Scheme Coupled	•
Spatial Discretization	
Gradient	^
Least Squares Cell Based 🔹	
Pressure	
Second Order 🔹	
Momentum	
Second Order Upwind 🔻	
Turbulent Kinetic Energy	
Second Order Upwind 🔻	
Specific Dissipation Rate	
Second Order Upwind 🔹	

Figura 48: "Solution methods" adottati

La scelta dello schema "Coupled" garantisce una robusta ed efficiente implementazione per fluidi monofase in stazionario, e delle performance superiori rispetto a uno schema di soluzione segregato, in combinazione con dei metodi di discretizzazione dell'energia cinetica turbolenta e del rateo specifico di dissipazione di ordine superiore.

Si è utilizzata un'inizializzazione ibrida, e si è fatto girare il programma per 1500 iterazioni, raggiungendo il "plateau" di stabilità dei residui, come visibile in Figura 49.



Figura 49: Residui della simulazione CFD

5.3.4.3. Confronto dei risultati delle simulazioni CFD

La configurazione adottata permette di ottenere un campo di moto sufficientemente uniforme in una porzione significativa della camera di prova, con una velocità massima di circa 8 m/s. Si è deciso di riportare il campo di velocità in un piano longitudinale di mezzeria della galleria in Figura 50 ("Contour") e in Figura 51 ("Vector"). È visibile, nella parte inferiore della camera di prova, un flusso uniforme di altezza pari circa a 2,50 m (dimensione vincolata dall'altezza del tratto finale del condotto convergente), mentre nella parte superiore si possono notare delle regioni di ricircolo dell'aria.



Figura 50:" Contour 1" – Modulo del vettore velocità in un piano di mezzeria della galleria del vento



Figura 51: "Vector 1" – Vettori velocità in un piano di mezzeria della galleria del vento

L'uniformità del flusso in camera di prova è visibile anche in un piano trasversale situato tra i due banchi di ventilatori, a 1,325 m dal suolo (Figura 52).



Figura 52: Contour 2 - Modulo del vettore velocità in un piano parallelo rispetto al suolo, posto a 1,325 m di altezza

Tali risultati possono essere messi a confronto con i relativi grafici ottenuti dalle simulazioni svolte dal DIMEAS:



Figura 53:da DIMEAS," Contour I" – Modulo del vettore velocità in un piano di mezzeria della galleria del vento



Figura 54: da DIMEAS, "Vector 1" – Vettori velocità in un piano di mezzeria della galleria del vento



Figura 55: da DIMEAS, Contour 2 - Modulo del vettore velocità in un piano parallelo rispetto al suolo, posto a 1,325 m di altezza

Si può notare come il flusso uscente dalle ventole non sia stato fedelmente riproposto con le simulazioni CFD impostate su ANSYS Fluent; ciò potrebbe essere dovuto alla differenza di "Fan boundary condition" impostata, o all'adozione del modello stazionario, piuttosto che un modello transitorio. Per verificare, invece, l'uniformità del flusso nella regione della camera di prova in cui è prevista l'installazione del mockup, sono stati riportati i profili di velocità del piano di mezzeria della galleria del vento, a diverse distanze riferite all'ingresso della galleria del vento (Figura 56).



Figura 56: Le posizioni scelte per valutare i profili di velocità sul piano di mezzeria della galleria corrispondono alle distanza dall'ingresso del condotto convergente pari a 7, 8, 9, 10, 11, 12 e 13 m

Dal confronto tra i grafici ottenuti (Figura 57, Figura 58 e Figura 59), si evince come la componente di velocità assiale sia dominante rispetto alle altre due, confermando dunque, che il flusso sia ben allineato lungo l'asse della galleria del vento. In prossimità del suolo si forma, come previsto, un boundary layer spesso pochi cm, mentre in altezza la zona uniforme si estende fino a circa 2.0 m dal suolo; tale informazione dovrà essere tenuta in considerazione per la progettazione del mockup sperimentale. I profili relativi alle posizioni comprese tra 7 e i 12 m sono quasi sovrapposti, mentre il profilo relativo alla posizione 13 m si discosta dagli altri: probabilmente a tale distanza si comincia a sentire l'effetto dovuto alla presenza dei ventilatori.



Figura 57: Profilo di velocità orizzontale in camera di prova sul piano di mezzeria a diverse distanze lungo l'asse della galleria



Figura 58: Profilo di velocità verticale in camera di prova sul piano di mezzeria a diverse distanze lungo l'asse della galleria.



Figura 59: Profilo di velocità trasversale in camera di prova sul piano di mezzeria a diverse distanze lungo l'asse della galleria



Dei risultati simili, sono stati ottenuti anche dalle simulazioni effettuate dal DIMEAS:

Figura 60: da DIMEAS, Profilo di velocità orizzontale in camera di prova sul piano di mezzeria a diverse distanze lungo l'asse della galleria



Figura 61: da DIMEAS, Profilo di velocità verticale in camera di prova sul piano di mezzeria a diverse distanze lungo l'asse della galleria.



Figura 62: da DIMEAS, Profilo di velocità trasversale in camera di prova sul piano di mezzeria a diverse distanze lungo l'asse della galleria

Le differenze dei valori di velocità sono dovute a un diverso punto di lavoro impostato dalla simulazione del DIMEAS, i quali hanno verificato di rispettare il limite di potenza massima assorbibile dai ventilatori pari a 70 kW. Con il presente lavoro di tesi si è voluto, invece, riproporre il campo di moto utilizzato nelle simulazioni CFD da validare, la cui velocità all'imbocco della piattaforma sperimentale deve essere

pari a 6 m/s; in particolare, la portata trattata dal singolo ventilatore, che garantisce il salto di pressione necessario a ricreare il campo di vento voluto, è circa 42000 m³/h, e facendo riferimento alla Figura 34 la potenza assorbita è circa pari a 7 kW: considerando il numero di ventilatori installato pari a 10, si è vicini al limite della potenza elettrica massima installabile, e dunque l'adozione di ventole caratterizzate da una curva di potenza differente potrebbe essere consigliata.

Per completezza espositiva, si riportano i "Contour" relativi alle simulazioni CFD effettuate nella galleria del vento con il mockup installato nella zona di flusso omogeneo, compresa tra 7 e 11 m, con le stesse impostazioni di mesh e setup precedentemente discusse. In particolare, si è scelto di posizionare il mockup in maniera tale che il suo centro geometrico (riferito alle dimensioni del deck) sia in corrispondenza della linea "9 m", presente in Figura 56. Si è scelto, inoltre, di ruotare di 45° l'asse longitudinale del mockup, rispetto all'asse longitudinale della camera di prova, in quanto risulta massimizzata l'area frontale del mockup esposta al flusso di vento. È chiaramente visibile come il flusso di vento risulti in piccola parte influenzato dalla presenza del mockup, soprattutto per la zona di imbocco del mockup. Inoltre, il mockup risulta essere sufficientemente lontano dalle pareti del laboratorio, riducendo al minimo gli effetti di bordo. Per chiarimenti riguardanti la progettazione del mockup sperimentale, si rimanda al Capitolo 6.



Figura 63: "Contour 1" – Modulo del vettore velocità in un piano di mezzeria della galleria del vento in presenza del mockup installato in camera di prova



Figura 64: Contour 2 - Modulo del vettore velocità in un piano parallelo rispetto al suolo, posto a 1,325 m di altezza, in presenza del mockup installato in camera di prova

5.4. MOCKUP SPERIMENTALE

Il modello di piattaforma e le dimensioni caratteristiche adottate nel lavoro di [8], come discusso al Paragrafo 4.3, sono di seguito riportate, in quanto sono state utilizzate come riferimenti per la progettazione definitiva del mockup, trattata al Capitolo 6.

Il modello di piattaforma individuato come riferimento per la progettazione del mockup sperimentale è stato scelto a seguito di un'analisi delle piattaforme presenti nel territorio italiano, oggetto del Paragrafo 2.6.1.

A causa della bassa profondità delle acque appartenenti alla zona del Mar Adriatico, le due strutture utilizzate per le installazioni off-shore sono di tipo fisso a struttura reticolare, a 4 o a 8 gambe. Poiché il contesto di lavoro riguarda lo studio del rilascio incidentale di gas e la successiva diffusione a bordo della piattaforma, si è deciso, in via progettuale, di riferirsi a una struttura a 4 gambe: tale soluzione è di semplicità costruttiva (rispetto a una struttura a 8 gambe) e, inoltre, poiché la base strutturale del mockup

non risulta essere interessata dal fenomeno di rilascio di gas, non risulta essere determinante ai fini della simulazione del rilascio di gas a bordo del piano della piattaforma (deck).

Per quanto riguarda il "top-side" della piattaforma di riferimento, si sono considerate le piattaforme presenti nel report prodotto dal MISE [20], e si è visto che mediamente esse sono dotate di 3 deck. Tra le piattaforme marine ammissibili sul territorio italiano, dunque, si sono confrontate le dimensioni delle piattaforme dotate di una struttura reticolare a 4 gambe con un numero di deck pari a 3.

I deck che si vogliono riproporre sono:

- **Cellar Deck:** deck inferiore della piattaforma, esso contiene 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: deck centrale della piattaforma, è adibito al trattamento e alla trasformazione del greggio; questa è la zona più critica dell'impianto da un punto di vista di eventuali incidenti di rilascio di gas, poiché 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 (la "Technical Control Room").
- Main Deck: deck superiore, è la zona che ospita il "Living Quarter" (LQ) 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 LQ e a tutta la piattaforma.

In Figura 65 è riportato un esempio di piattaforma reale con geometria confrontabile con quella che si vuole costruire.



Figura 65: AMELIA C – Esempio di piattaforma off-shore di riferimento

Si è scelta, durante la fase preliminare di progettazione, una pianta reale di dimensioni 30 m * 20 m, e con una distanza inter-deck compresa nel range 5 m \div 7 m. Non essendo possibile riprodurre la piattaforma in scala reale all'interno del laboratorio, si è deciso di scalare il modello della piattaforma con un rapporto di scala 1:10 [9]. A seguito di questa scelta, si dovrà prestare attenzione al campo di moto del vento che si intende ricreare, affinché venga rispettata la similitudine fluidodinamica del modello con la realtà. Inoltre, affinché il mockup risulti pienamente centrato dal flusso di vento generato, dovrà essere installato nella camera di prova della galleria del vento. I dettagli riguardanti le gallerie del vento sono trattati al Paragrafo 5.3.

Il mockup avrà, dunque, delle dimensioni di pianta pari a 3 m * 2 m, con una distanza interdeck pari a $0,5 \text{ m} \div 0,7 \text{ m}$. Per quanto riguarda l'altezza complessiva del modello di piattaforma, si è individuato come vincolo l'altezza del flusso di vento proveniente dal condotto convergente di immissione in camera di prova della galleria del vento. Per i dettagli riguardanti il flusso di vento generato si rimanda al Paragrafo 5.3.4.2.

In Figura 66 un'immagine riguardante il mockup; si anticipa che il piano di interesse scelto per la prova sperimentale è il "*Production Deck*", e sarà allestito con degli oggetti, di seguito chiamati "*ingombri*", il cui scopo è riproporre il grado di congestione tipico di un deck di piattaforma.



Figura 66: Mockup della piattaforma off-shore di riferimento; dall'alto verso il basso: Main Deck; Production Deck; Cellar Deck

I dettagli della progettazione del mockup sono trattati al Capitolo 6.

5.5. SISTEMA DI DISTRIBUZIONE DEL GAS

Come già anticipato al Paragrafo 5.1, il sistema di distribuzione di gas, necessario ai fini della prova sperimentale di rilascio di gas in pressione, non è trattato all'interno di questo elaborato di tesi in quanto non completamente definito al momento della stesura del testo.

Si vuole però aggiungere brevemente che affinché possa essere soddisfatta la funzione "*c*" indicata al Paragrafo 5.1, argomento già trattato da [10], è necessaria la presenza di un sistema di distribuzione di gas che collega il deposito di stoccaggio del gas, da utilizzare per l'esperimento di rilascio, con l'ugello di rilascio, cioè l'oggetto predisposto al rilascio di gas posizionato nel punto di interesse, direttamente sul mock-up della piattaforma.

Il gas individuato da [10] e scelto per lo svolgimento delle prove sperimentali consiste in una miscela aria-metano in percentuali volumetriche 97,5%-2,5%, ben al di sotto del limite inferiore di infiammabilità del metano (*Low* Flammability Level, LFL_{CH4} = 5%). L'LFL rappresenta un limite oltre il quale una miscela aria-gas può essere innescata (fino al suo limite di infiammabilità superiore, *Upper Flammability Level*, LFL_{CH4} = 15%).

Il sistema di distribuzione di gas, inizialmente proposto da [10], e riportato in Figura 67, risulta essere formato dai seguenti componenti:

- "Bombola di stoccaggio del gas con relativa valvola di sicurezza;
- *Riduttore di pressione, necessario per abbassare la pressione della bombola (200 Bar) alla pressione operativa del box"* che coincide con la pressione di rilascio con la quale si vuole effettuare la simulazione di rilascio incidentale di gas (il range di variabilità della pressione di rilascio ai fini delle simulazioni è in fase di valutazione);
- 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 di rilascio, la cui sezione di uscita, come visto in precedenza, sarà pari a 9,5 mm" (la scelta del diametro dell'ugello di rilascio è in fase di rivalutazione).



Figura 67: schema dell'impianto di distribuzione gas proposto da [10]

I parametri del sistema di distribuzione di gas, risultati degli studi affrontati in [10], sono riportati in Tabella 7.

Parametri del sistema di distribuzione di gas				
Volume box intermedio	m^3	5		
Pressione box intermedio	bar	P _{op}		
Temperatura box intermedio	°C	25		
Diametro ugello	mm	9,5		

Tabella 7: Parametri del sistema di distribuzione di gas [10]

Come si evince dalla Figura 67, tale soluzione prevede un box intermedio posto tra le bombole di stoccaggio e l'ugello di rilascio, il cui scopo è quello di sostenere il rilascio per l'intera durata prevista, che si ricorda essere pari 60 s (Paragrafo 5.1), con l'obiettivo di mantenere i parametri di rilascio (pressione e portata) il più possibile costanti.

La costruzione di tale box, però, non ci assicura che la miscela, una volta espansa dalla bombola di stoccaggio al box intermedio possa mantenere una miscelazione uniforme, causando dunque fenomeni di stratificazione interna. Ciò potrebbe determinare la formazione di alcune zone caratterizzate dalla presenza di miscela con rapporti volumetrici rientranti nel range di infiammabilità. Una valida alternativa potrebbe essere fornita dalla soluzione tecnologica riportata in Figura 68.



Figura 68: alternativa allo schema dell'impianto di distribuzione gas proposto da [10]; tale soluzione prevede la miscelazione direttamente in linea della miscela di gas nel rapporto volumetrico richiesto

In Figura 68, si può notare l'abolizione del box intermedio e l'adozione di un sistema di miscelazione in linea, ricorrendo a un miscelatore che consenta di miscelare gas metano puro, stoccato in bombole da 200 bar, con aria, prelevata dall'ambiente tramite un compressore esterno, direttamente sulla linea di distribuzione di gas nel rapporto volumetrico richiesto e con la portata di interesse.

Al momento tale sistema di distribuzione è ancora in fase di definizione, indi per cui non sarà tenuto in considerazione nel proseguo dell'elaborato di tesi.

5.6. SENSORISTICA, ELETTRONICA A SERVIZIO DELLE PROVE SPERIMENTALI, ACQUISIZIONE E ANALISI DATI

Come già anticipato al Paragrafo 5.1, la raccolta dei dati sperimentali, necessaria ai fini della validazione dei modelli CFD, non è trattata all'interno di questo elaborato di tesi in quanto non completamente definito al momento della stesura del testo. Si vuole però brevemente aggiungere che, tenendo in considerazione che la raccolta dei dati sperimentali (si è interessati a valori di concentrazione, alla velocità del flusso e a valori del campo di pressione a bordo del mockup) deve consentire un confronto con i risultati delle simulazioni CFD ai fini di validazione dei modelli e che la progettazione definitiva del laboratorio SEASTAR prevede la progettazione della sensoristica, dell'elettronica a servizio delle prove sperimentali, del sistema di acquisizione e di analisi dei dati, si riportano di seguito i principali requisiti funzionali che devono essere assolti:

- Sensibilità alla sostanza scelta per il rilascio di gas (in questo caso metano);
- Range di misurabilità ampio;
- Lunga vita operativa;
- Possibilità di installazione al livello del deck, cercando di modificarne il meno possibile la geometria;
- Dimensioni dei sensori il più possibile contenute (si prevede una dimensione trasversale pari a 1-2 cm), tali da poter trovare alloggio all'interno degli ingombri del deck per influenzare il meno possibile il campo di moto sul deck;
- Realizzazione dei collegamenti elettronici all'esterno del deck di riferimento, per influenzare il meno possibile la geometria del deck;
- Raccolta dei dati all'interno di un database con il quale poter procedere con il confronto con i risultati delle simulazioni CFD.

La progettazione del mockup sperimentale, oggetto del Capitolo 6, è stata affrontata tenendo in considerazione parte dei requisiti funzionali sopra citati.

5.7. CONDIZIONI DI FUNZIONAMENTO DEL LABORATORIO

Le principali condizioni di funzionamento del laboratorio sono basate sulla soluzione realizzativa costituita dal sistema di distribuzione di gas con la presenza del box intermedio e sono sintetizzate in Tabella 8; a seguire, la descrizione dettagliata delle principali fasi operative.

Fase	Denominazione	Step principali					
		- Collegamento dello stock bombole di stoccaggio alla linea di distribuzione del gas					
		- Apertura del rubinetto delle bombole					
Ricarica iniziale 1 box-intermedio	- Riduttore di pressione settato alla pressione operativa di riferimento						
	- Controllo della temperatura del box intermedio e attesa ripristino condizioni operative						
		- Chiusura del rubinetto delle bombole di stoccaggio					
		- Verifica di una corretta chiusura delle bombole di stoccaggio					
Sostituzione hombole		- Rimozione delle bombole esauste					
2 stoccargio	- Inserimento dello stock di bombole nuove						
	sioccuggio	- Collegamento con la rete di distribuzione					
		- Apertura del rubinetto delle bombole di stoccaggio					
		- Mock-up in camera di prova					
		- Sgombero della camera dal personale di sala					
		- Isolamento del sistema di aerazione in camera di prova					
		- Accensione dei ventilatori					
3	Prova	- Valvola di rilascio ON/OFF in modalità ON					
		- Abbassamento della pressione nel volume del box intermedio					
		- Apertura della membrana del riduttore di pressione con conseguente flusso di gas verso il box intermedio					
		- Valvola di rilascio ON/OFF in modalità OFF					

Tabella 8: Condizioni di funzionamento del Laboratorio SEASTAR

- Acquisizione dei dati riguardanti la dispersione di gas
- Apertura del sistema di aerazione con immissione di aria esterna in camera prova
- Controllo della concentrazione di gas in camera di prova
- Spegnimento ventilatori

Si propongono di seguito descrizioni dettagliate riguardanti le condizioni operative del laboratorio:

- Ricarica iniziale del box intermedio

Il box intermedio, posto tra la bombola di stoccaggio e l'ugello di rilascio, è stato previsto per evitare di gestire il rilascio direttamente dalla bombola. Il suo obiettivo è fungere da volume polmone e sostenere il rilascio durante tutta la durata di rilascio (60 s), mantenendo tutti i parametri di rilascio costanti.

L'operatore provvede al collegamento e verifica delle relative tubazioni di collegamento di gas (bombola di stoccaggio - box intermedio; box intermedio - ugello di rilascio), utilizzando una schiuma per gas per individuare l'eventuale fuoriuscita di gas dalle principali zone di collegamento.

Dopodiché, l'operatore può procedere all'apertura del rubinetto della bombola di stoccaggio, grazia alla quale il gas può fluire nel box intermedio per mezzo del gradiente di pressione instaurato dal riduttore di pressione posto tra l'ambiente di stoccaggio e il box intermedio.

Finita questa fase di ricarica, durante la quale avviene l'espansione rapida del gas di stoccaggio da 200 bar alla pressione operativa del box (dell'ordine dei 10 bar), con conseguente abbassamento di temperatura, è necessario aspettare un po' di tempo affinché il gas torni a temperatura ambiente. Per questa fase dunque è previsto uno strumento di controllo della temperatura all'interno del box, e fin quando quest'ultimo non è in equilibrio con l'ambiente esterno, non si potranno avviare le prove.

L'operatore provvede alla chiusura del rubinetto dello stock di bombole che è stato utilizzato per il refill iniziale.

- Sostituzione bombole stoccaggio

Prima di procedere alla sostituzione delle bombole di stoccaggio, occorre verificare la corretta chiusura del rubinetto delle bombole di stoccaggio.

Verificato che la chiusura del rubinetto delle bombole di stoccaggio sia stata eseguita correttamente, si procede con la rimozione in sicurezza delle bombole esauste.

Terminata la fase di rimozione delle bombole, occorre procedere all'installazione dello stock di bombole nuove. L'operatore deve verificare che il collegamento con la rete di distribuzione del gas sia idoneo e non presenti perdite.

Verificato ciò, si può procedere con l'apertura del rubinetto delle bombole di stoccaggio.

- Prova sperimentale

L'avvio della prova sperimentale può avvenire non appena il gas all'interno del box intermedio è in equilibrio con l'ambiente esterno (è presente un controllo sulla temperatura interna al box intermedio), e tutte le condizioni al contorno riguardanti la prova sono state settate (mock-up in posizione, configurazione degli ingombri sul deck scelto per il rilascio, scelta e sistemazione della fonte di rilascio, posizionamento dei sensori sulla piattaforma per la rilevazione del gas, condizioni ambientali esterne da ricreare in camera di prova).

La camera di prova deve essere sgomberata da eventuale personale di sala, e l'operatore deve verificare, prima di fare partire la prova, che i condotti di immissione ed estrazione della camera del vento siano liberi da eventuali ostacoli.

L'operatore, intervenendo dal pannello di controllo (situato all'interno della camera di controllo, prevista al Livello 2), provvede all'isolamento del condotto di aerazione interno alla camera di prova.

Verificate queste condizioni, l'operatore attiva i ventilatori agendo sul pannello di controllo. A seconda del campo di vento che si intende generare, l'operatore può scegliere quali ventilatori attivare e con che grado di parzializzazione. Una volta che il campo di moto risulta omogeneo e uniforme, l'operatore agisce sulla valvola di rilascio ON/OFF tramite il pannello di controllo, impostandola su ON consentendo al gas di fuoriuscire dall'ugello di rilascio, nella posizione impostata precedentemente. La valvola, settata precedentemente a 60 s, resta aperta per tutta la durata di rilascio. Al termine dei 60 s, dal pannello di controllo è inviato un segnale alla valvola che passerà in posizione OFF (in caso di malfunzionamenti, l'operatore potrà intervenire manualmente su tale valvola, essendo posizionata all'esterno della camera, bloccandone il rilascio di gas in camera di prova).

Acquisiti i dati della prova sperimentale, si può procedere alla riapertura dell'impianto di aerazione della camera di prova. L'immissione di aria pulita provvede a smaltire l'eventuale accumulo di gas in zone di ristagno nella camera di prova.

Verificata che l'atmosfera interna sia lontana dall'LFL, si potrà procedere allo spegnimento dei ventilatori.

- Stand-by

Finita la fase di prova sperimentale, l'operatore setta il laboratorio in modalità stand-by attivando il sistema di aerazione e procedendo con lo spegnimento dei ventilatori. Durante tale fase, occorre verificare che sia l'impianto di aerazione che il sistema di rilevamento della concentrazione di gas metano all'interno del laboratorio siano attivi. In caso di fallimento di uno dei due sistemi, l'operatore può procedere all'arresto d'emergenza del laboratorio.

- Arresto normale del laboratorio

L'arresto normale del laboratorio può essere eseguito direttamente dalla sala di controllo, dalla quale l'operatore esegue le seguenti operazioni:

- chiusura rubinetto bombola di stoccaggio (subito dopo lo svolgimento dell'ultima prova prevista per la giornata, per evitare che si proceda con il riempimento del box intermedio);
- spegnimento ventilatori (se l'ultima prova è stata eseguita subito prima della chiusura del laboratorio) o eventuale verifica;
- chiusura saracinesca del cavedio di emissione.

Per la verifica della chiusura della grata del condotto di immissione viene richiesto un intervento di tipo manuale.

L'operatore provvede a verificare che il sistema di monitoraggio di concentrazione del gas sia attivo, prima di lasciare il laboratorio.

- Arresto d'emergenza del laboratorio

In caso di rilevamento di un parametro operativo oltre il suo valore soglia, sensori mandano un segnale al pannello di controllo il quale interviene con il sistema d'allarme acustico/visivo. Se prevista, l'operatore dovrà procedere con la procedura d'emergenza.

6. PROGETTAZIONE DEL MOCK-UP SPERIMENTALE

Come già anticipato al Paragrafo 5.4, lo scopo del presente Capitolo riguarda la progettazione del mockup sperimentale: verrà chiarita la scelta dei requisiti costruttivi e funzionali che devono essere assolti dal modello di piattaforma e saranno fornite le linee guida che hanno guidato la progettazione del mockup.

Per l'introduzione al mock-up, nel contesto del laboratorio "SEASTAR", si rimanda al Capitolo 5 e in particolare al Paragrafo 5.4.

Si specifica che per quanto riguarda la modellazione e la progettazione del mockup, si è ricorso all'utilizzo di software di tipo CAD.

Inoltre, si vuole sottolineare come l'intera progettazione, e la successiva costruzione del mock-up sperimentale, dovrà essere svolta tenendo in considerazione il fatto che tutti i componenti annessi e connessi al mock-up entreranno nella galleria del vento attraverso la sezione più piccola del condotto convergente, posta all'ingresso della galleria del vento. Tale sezione ha dimensioni pari a 6,4 m * 2,5 m (per i dettagli relativi alla galleria del vento si rimanda al Paragrafo 5.3), Inoltre, l'operatore del laboratorio dovrà essere in grado di modificare la configurazione del mock-up manualmente e senza l'utilizzo di attrezzature speciali (come per esempio l'utilizzo di un carroponte).

Infine, si vuole segnalare che il seguente lavoro di progettazione del mockup vuole porsi come fase "definitiva" del lavoro di progettazione preliminare avviato da [9]. L'eventuale fase di progettazione esecutiva sarà avviata non appena si saranno individuati, e scelti, i fornitori del mockup i quali potrebbero fornire differenti tipologie di soluzioni costruttive, frutto della loro esperienza in tale campo, da conciliare con i requisiti costruttivi e funzionali che deve assolvere il mockup, ai fini di ottenere un modello di piattaforma coerente sia con la realtà che con le simulazioni CFD, ma che sia anche versatile: si vuole ottenere un mockup che possa essere modificato, entro certi limiti, al fine di poter ottenere nuove configurazioni, su cui svolgere ulteriori campagne sperimentali. A tal proposito, è stata proposta una soluzione realizzativa riguardante il dettaglio tecnico dei deck, degli ingombri e dell'ugello di rilascio (Paragrafo 6.2), che rispecchi i requisiti del mockup di riferimento che si vogliono ottenere, trattati al Paragrafo 6.1 e riassunti al Paragrafo 6.1.1.

6.1. IL "MOCKUP": MODELLO DI RIFERIMENTO

Le dimensioni caratteristiche del modello reale della piattaforma di riferimento, individuate nei lavori di tesi [9] e [10] e citate al Paragrafo 5.4, sono riportate in Tabella 9 e sono messe a confronto con le dimensioni del modello in scala 1:10 della piattaforma.

MODELLO REALE E MOCK-UP IN SCALA 1:10					
Dimensione m m					
Larghezza	30	3			
Lunghezza	20	2			
Spessore Deck	0,1	0,01			
Distanza inter-deck	5 - 7	0,5 - 0,7			

Tabella 9: Dimensioni di massima del modello di piattaforma di riferimento

Come precedentemente accennato al Paragrafo 5.4, la piattaforma è composta da 3 piani (deck), rinominati come segue (dal piano più basso al più alto):

- Cellar Deck;
- Production Deck;
- Main Deck.

Al fine di ricreare il grado di congestione tipico che si ha in una piattaforma off-shore, si è deciso di rappresentare i vari componenti, macchinari e possibili stoccaggi, tramite l'utilizzo di oggetti anch'essi in scala, chiamati "ingombri" (si rimanda al Paragrafo 6.2.2). Tali ingombri dovranno risultare fissi² durante l'esecuzione della prova sperimentale, ma la loro disposizione deve risultare variabile al fine di poter ricreare diverse configurazioni di deck di piattaforma: per questo motivo si è pensato di rendere la distanza inter-deck modificabile nelle due posizioni indicate in Tabella 9 (0,5 m e 0,7 m), agevolando in questa maniera il lavoro dell'operatore incaricato di cambiare la disposizione degli ingombri sul deck.

² Sul deck non vi devono essere elementi che in presenza di vento derivante dall'azione dei ventilatori durante la prova sperimentale, possano essere proiettate al di fuori del mockup ed interferire con il corretto funzionamento dei ventilatori stessi, e dunque con il buon esito delle prove sperimentali.

Va precisato che l'intero spazio sul deck scelto per l'esperimento dovrà dunque contenere esclusivamente gli oggetti che rappresentano gli ingombri di una piattaforma, il componente destinato al rilascio di gas (ugello di rilascio) e la sensoristica necessaria; non devono essere presenti altri elementi che possano influire sulla fluidodinamica della regione di prova, come per esempio cavi passanti da un deck all'altro o sistemi di bloccaggio. Per il raggiungimento di questo requisito funzionale, si è pensato di ricorrere a una struttura reggente costituita da 4 pilasti cavi a sezione quadrata. Per chiarezza esplicativa, si rimanda alla Figura 69 raffigurante la dimensioni di massima del deck, con il dettaglio riguardante il posizionamento dei piloni strutturali cavi a sezione quadrata.



Figura 69: Dettaglio delle dimensioni di massima del deck, con la sezione dei pilastri cavi; sono state riportate le quote riguardanti l'interasse tra i pilastri e il loro posizionamento rispetto alle dimensioni principali del deck; tutte le misure sono espresse in mm

Il piano di interesse del mockup, con cui confrontare, ed eventualmente validare, le simulazioni CFD è il "*Production Deck* ": è la zona della piattaforma più critica dal punto di vista di eventuali incidenti di

rilascio ed è stata oggetto delle simulazioni CFD condotte da [6], [7], e [8]. In Figura 70 è riportato il modello di piattaforma con il solo Production Deck allestito.



Figura 70: 3D rappresentativo del mock-up nel suo insieme, production deck più ingombri; gli ingombri sono riportati solo nel piano di interesse per semplicità rappresentativa

Si segnala che, oltre alle simulazioni effettuate sul *Production Deck*, potrebbe essere interessante studiare fenomeni di rilascio incidentali anche sul livello del *Cellar Deck*. Al momento ciò non è stato oggetto di simulazioni CFD, ma potrebbe essere oggetto di futuri studi.

Il mock-up deve essere installato all'interno di prova della galleria del vento, affinché possa risultare pienamente investito dal flusso di vento generato. In Figura 71 è riportato un esempio di installazione del mockup all'interno della camera di prova della galleria del vento.



Figura 71: Vista isometrica della galleria del vento e del mockup installato in camera di prova

L'installazione del mockup sperimentale è prevista nella zona in cui il flusso di vento è il più uniforme possibile, ovvero, allo sbocco del condotto convergente, in una posizione centrata rispetto alla larghezza del laboratorio. Inoltre, dal momento che non è possibile ruotare i ventilatori della galleria del vento, si è deciso di porre l'intera struttura su un piano ruotabile o rotobase, Figura 72, per riprodurre un più ampio spettro di direzioni del vento: ruotando semplicemente il deck con scatti di rotazione pari a 22°30', si potranno simulare le 16 direzioni del vento. È importante prevedere un meccanismo di bloccaggio della rotobase nella posizione di interesse che contrasta la forza applicata dal vento durante le simulazioni, affinché il mockup risulti stabile e fermo durante l'esecuzione della prova sperimentale.

Occorre sottolineare che, tale struttura di sostegno dovrà essere dotata di una buona resistenza meccanica e inoltre dovrà resistere alle sollecitazioni generate dal campo di vento caratterizzato da una velocità massima di 10 m/s. Non sono ammesse flessioni e/o rotazioni della struttura dovute all'intrinsecità della struttura stessa e/o alle sollecitazioni durante le prove sperimentali a cui la struttura sarà sottoposta.



Figura 72: Particolare della rotobase e pilastri del mockup; la rotobase deve consentire una rotazione del mockup tale da poter simulare diverse direzioni di vento incidente sulla piattaforma

Sempre per garantire che il deck di interesse (Production deck per il momento, ma in futuro potrebbe essere il Cellar deck, o entrambi) sia centrato rispetto al campo di vento, si è considerata l'altezza media del flusso uscente dal condotto convergente, pari a 2,5 m (per i dettagli del campo di vento all'interno della camera di prova si rimanda al Paragrafo 5.3). Tale vincolo è stato tenuto in considerazione per la scelta dell'altezza dei piloni strutturali. Al fine di poter posizionare il deck di interesse centrato rispetto al flusso di vento, saranno previste 3 posizioni di regolazione:

- Posizione 1: Distanza suolo- superficie inferiore primo deck pari a 0,48 m;
- Posizione 2: Distanza suolo- superficie inferiore primo deck pari a 0,735 m;
- Posizione 3: Distanza suolo- superficie inferiore primo deck pari a 0,99 m.

Tali posizioni sono riferite ai vincoli geometri e costruttivi indicati in Tabella 10.

Tabella 10: Vincoli geometrici e costruttivi che hanno determinato le posizioni di centramento del deck di interesse del mockup

Centramento Deck di interesse				
Altezza uscita convergente	2.5	m		
Metà altezza uscita convergente	1,25	m		
Altezza di riferimento a metà deck	1,25	m		
Altezza Inter - Deck	0,5	m		
Spessore Deck	0,01	m		
Range di variazione (Pos. 1, 2, 3)	0.48 - 0.735 -			
Distanza suolo - superficie inferiore	0.99	m		
1°deck	0,99			

A titolo esplicativo, è riportato in Figura 73 il mockup in Posizione 1 (distanza suolo-superficie inferiore del cellar deck pari a 0,48 m).



Figura 73: Vista laterale del mockup in Posizione 1; la distanza suolo-Cellar Deck risulta essere pari a 0.48m

Come si evince dalla Figura 73, la distanza minima dal suolo, riferita alla superficie inferiore del primo deck, è pari a 0,48 m (Pos. 1). In questa posizione, il Production Deck sarà centrato rispetto al flusso di vento uscente dal condotto convergente, la cui altezza totale è di 2,50 m. L'altezza massima, corrispondente a 0,99 m (Pos. 3), invece, garantisce che il Cellar deck sia centrato rispetto al campo di vento. Se si vuole eseguire una simulazione contemporanea su entrambi i decks, essi devono essere centrati rispetto al campo di vento, utilizzando l'altezza intermedia pari a 0,735 m (Pos. 2).

Si sottolinea che tali distanze si riferiscono al suolo del laboratorio e non alla base di sostegno del mockup, la cui altezza per il momento non può essere individuata. Durante la progettazione dei piloni strutturali, e della base rotabile di sostegno bisognerà tenere conto di questo aspetto.

Va segnalato che nella zona compresa tra la base ruotabile e la superficie inferiore del deck, è prevista l'installazione dell'elettronica necessaria al funzionamento della sensoristica, Figura 74. Sfruttando la cavità dei piloni strutturali sarà possibile portare i cavi necessari per il collegamento della sensoristica posizionata a bordo del deck di interesse con la centralina elettronica, il cui ruolo è quello di comunicare con la sala di controllo comunicando le misurazioni registrate durante la prova sperimentale, senza influire sulla geometria, e quindi sulla fluidodinamica, del deck di interesse.



Figura 74: Vista laterale del mockup, con indicazioni riguardanti le posizioni dell'elettronica che asservirà alla sensoristica, tutti i cavi partiranno dai box E1- E2 e tramite i pilastri cavi raggiungeranno i sensori sui vari deck.

Infine, considerato che il mock-up sarà posizionato all'interno di una galleria del vento del tipo "subsonica a circuito aperto, con camera di prova aperta", dove, l'intero volume della galleria del vento sarà soggetto alle condizioni dell'aria prelevata dall'ambiente esterno, allora, le condizioni di utilizzo del mockup saranno:

 Temperatura media annua pari a 12°C (fonte: Arpa Piemonte – Dati ed elaborazioni – Torino – 1971-2000);

- Umidità relativa media pari a 73,8% (fonte: Servizio Meteorologico dell'Aeronautica militare 1971-2000);
- Velocità massima del campo di vento pari a 15 m/s.

Tali informazioni dovranno essere tenute in considerazione per la fase di progettazione esecutiva, durante la quale verranno scelti i materiali, e la tipologia di soluzione costruttiva del mockup.

6.1.1. Sintesi requisiti generali

È stato ritenuto utile riassumere i principali requisiti strutturali e funzionali del mockup, trattati al paragrafo 6.1, in una lista riepilogativa:

- Struttura a 4 pilastri di sezione quadrata;
- I 3 Deck dovranno essere forati in corrispondenza dei pilastri di sostegno;
- Le misure dei deck dovranno essere pari a 3 m * 2 m;
- I pilastri che sorreggeranno la struttura dovranno essere cavi, così da poter essere utilizzati per il cablaggio dei sensori che equipaggeranno gli ingombri sui deck;
- Distanza interdeck variabile: 0,5 m 0,7 m;
- Distanza suolo-primo deck variabile: 0,48 0,735 0,99 m;
- I pilastri della struttura devono essere posati e ancorati su una base rotabile, questa dovrà ruotare con scatti di 22° 30', cosi da potere posizionare il mockup in 16 posizioni differenti;
- Gli ingombri che verranno posizionati su ognuno dei 3 deck devono poter essere bloccati; il fissaggio degli ingombri deve essere di tipo fast turn, per un'agevole modifica del layout;
- L'operatore dovrà essere in grado di modificare la configurazione del mock-up, manualmente e senza l'utilizzo di attrezzature speciali (carroponte);
- Dovrà essere possibile agganciare sotto ogni deck l'elettronica destinata alla sensoristica che equipaggerà gli ingombri;
- Possibilità di posizionare e ruotare l'ugello di rilascio nella direzione desiderata.

6.2. PROPOSTA DI SOLUZIONE COSTRUTTIVA

Il seguente paragrafo ha per oggetto la proposta di una tipologia di soluzione costruttiva per quanto riguarda la realizzazione del mockup sperimentale. Come già anticipato nel paragrafo introduttivo del presente capitolo, sarà cura del fornitore incaricato della realizzazione del mockup sperimentale fornire dei feedback e/o soluzioni alternative, concilianti con i requisiti costruttivi e funzionali trattati al Paragrafo 6.1.

6.2.1. Layout deck

I requisiti che devono essere assolti dai deck possono essere riassunti nella seguente lista:

- Provvedere a un alloggio stabile per ingombri (il fissaggio deve essere tale da garantire il bloccaggio in fase di prova, ovvero quando il flusso di vento investe gli ingombri.);
- Fornire un apposito ingresso per l'ugello da cui verrà rilasciato il gas;
- Garantire diverse configurazioni possibili per la disposizione degli ingombri;
- Permettere il passaggio e l'alloggio dei cavi destinati alla sensoristica.

Una possibile soluzione è quella proposta in Figura 75.



Figura 75: esempio di griglia (100mm X 100mm) da predisporre sul deck

L'immagine rappresenta una possibile griglia di costruzione necessaria per forare l'intera superficie del deck. In particolare, il foro andrebbe praticato nel centro delle celle (100 mm x 100 mm) che l'utilizzo di questa griglia virtuale genererebbe. Utilizzando questa soluzione la superficie di ogni deck risulterebbe avere 592 fori (30 colonne, 20 righe,).

Il foro destinato al fissaggio degli ingombri può essere utilizzato anche per il passaggio dell'ugello di rilascio, le cui dimensione minime sono 9,5 mm e dimensioni massime ancora in fase di valutazione. Tale dimensione massima deve essere usata come riferimento per la dimensione del foro delle celle.

6.2.2. Ingombri

Gli ingombri da realizzare secondo le specifiche descritte sono quelli che fanno riferimento al Production Deck (superficie soggetta a studi sperimentali), vedi Tabella 12. Sono fornite anche le dimensioni geometriche riferite agli ingombri relativi al Main ed al Cellar Deck (Tabella 11 e Tabella 13), mentre la loro tipologia costruttiva verrà definita in un secondo momento, dunque non sono da considerare nel seguente studio.

La scelta delle dimensioni e del posizionamento degli ingombri fa riferimento alla tipica disposizione ed alle dimensioni di ingombri che normalmente si possono trovare in una piattaforma di estrazione di gas come quella presa in analisi.

In particolare, gli ingombri che si vogliono realizzare, rappresentano:

- Oggetti ritenuti interessanti dal punto di vista di un eventuale rilascio incidentale di gas in quanto possibili sorgenti di tale fenomeno come, separatori, serbatoi di stoccaggio di sostanze pericolose, ecc;
- 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 ad elevata concentrazione di persone, quindi, per i nostri scopi, risulta d'interesse capire come si evolverebbe un'eventuale nube di materiale tossico attorno a questi edifici; inoltre, dal punto di vista dell'ingombro, rappresentano strutture di dimensioni non trascurabili.

La lista completa degli ingombri da considerare, con le relative misure, sono riportati nelle seguenti tabelle.

Componente	Item	#	Lato 1 / Diametro [mm]	Lato 2 [mm]	Altezza [mm]
Living Quarter	LQ	1	830	1600	690
Hp Gas Compressor Turbines	HPGT	2	850	190	330
HP Compressor Discharge Coolers	HPCDC	4	290	[-]	300

Tabella 11: Elenco componenti "ingombri" e relative misure per il Main Deck

Tabella 12: Elenco componenti "ingombri" e relative misure per il Production Deck (Oggetto di studio)

Componente	Item	#	Lato 1 / Diametro [mm]	Lato 2 [mm]	Altezza [mm]
Power Generators	PG	2	100	300	180
Diesel Fuel Storage Tank	DFST	2	150	[-]	380
Technical Control Room	TCR	1	1250	500	500
HP Separators	HPS	2	400	150	230
HP Compressor Suction/Discharge Scrubber	HPCS	2	100	[-]	380
Oil Treater	ОТ	1	400	150	160
Lact Unit	LU	1	450	200	100
Dry Oil Tank	DOT	1	350	100	150
Glychol Regeneration Pump	GRP	1	150	150	150
Glychol Regenertion Tank	GRT	1	150	[-]	380
Glychol Regenertion Skid	GRS	2	400	250	250
Pig Trap Launcher	PTL	1	400	50	150
Gas Filter Separator	GFS	1	100	[-]	380

Tabella 13: Elenco componenti "ingombri" e relative misure per il Cellar Deck

Componente	Item	#	Lato 1 / Diametro [mm]	Lato 2 [mm]	Altezza [mm]
Potable Water Tank	WT	1	200	[-]	380
Gas Sales Pipeline Launcher	GSPL	1	400	50	150
Fuel Gas Filter Separator	FGFS	1	300	100	430
Oil Pipeline Pumps	OPP	3	200	100	300
N2 Generator	N2G	1	250	200	450
HP Flare Scrubber	HPFS	1	500	100	150
Fire water Pump Skid	FWPS	2	200	100	250
Fire Water Pumps	FWP	3	100	[-]	180
Fuel Gas Compressor	FGC	2	250	150	250
Air Compressor	AC	2	200	100	150
Water Skimmer Skid	WSS	1	400	150	150
--------------------	-----	---	-----	-----	-----
Fuel Gas Skid	FGS	1	300	200	250

Di seguito in Figura 76, gli ingombri posizionati sul Production deck, rappresentati in pianta.



Figura 76: Ingombri posizionati sul Production deck; rispettano le posizioni assunte nelle simulazioni CFD (si veda Figura 24)

La realizzazione dell'ingombro corrispondente alla "Technical Control Room – TCR" deve essere pensata tenendo in considerazione che al suo interno devono essere compresi i due piloni strutturali, come da simulazione CFD, vedi Figura 77.



Figura 77: 3D di massima del mockup; in ciano, tutti gli ingombri del Production Deck ed in particolare il box della Technical Control Room che ingloba i 2 pilastri

Tutti gli ingombri dovranno essere realizzati seguendo le specifiche presentate al precedente paragrafo, quali:

- Gli ingombri dovranno essere bloccati sul deck per resistere al campo di vento presente in galleria;
- Gli ingombri devono essere realizzati in modo tale da poter ospitare al loro interno i componenti necessari alla sensoristica;
- Gli ingombri non dovranno avere massa rilevante tale per cui risulterebbe difficile agire su di essi con facilità e maneggevolezza.

A tal proposito, la soluzione realizzativa che si suggerisce è la seguente:

- Struttura interna cava, tale da consentire l'installazione dei componenti necessari alla sensoristica;
- Piastra inferiore forata, che permette il bloccaggio dell'ingombro sul deck (facendo coincidere il foro della piastra alla base dell'ingombro con il foro presente sul deck);
- Una faccia dell'ingombro deve essere smontabile e deve presentare delle aperture (fori) di diametro pari a 100 mm (grandezza in fase di definizione) per l'installazione del trasduttore necessario alla sensoristica.

L'ingombro non dovrà presentare aperture oltre quelle necessarie alla predisposizione della sensoristica. Le aperture dovranno essere praticate solo su una faccia dell'ingombro e queste dovranno essere sigillate tramite guarnizioni per evitare infiltrazioni di gas all'interno degli ingombri. A titolo esplicativo, la Figura 78 e la Figura 79 rappresentano due tipologie di ingombri:

- Tipo1: parallelepipedo;
- Tipo2: cilindrico.

_



Figura 78: 3D Ingombro Tipo 1, come si nota dalla figura a destra, il corpo dell'ingombro è cavo e la faccia frontale è removibile, essa verrà fissata all'involucro dell'ingombro tramite 4 elementi filettati



Figura 79: 3D Ingombro Tipo 2, come si nota dalla figura a destra, il corpo dell'ingombro è cavo e la faccia frontale è removibile, essa verrà fissata all'involucro dell'ingombro tramite 4 elementi filettati

6.2.3. Pezzo speciale: Source Box

Tra gli oggetti da inserire sul deck, merita un paragrafo a parte la "Source Box", elemento chiave delle simulazioni CFD condotte da [8] e ripresa al Paragrafo 4.4.

Le simulazioni CFD di rilascio di gas e dispersione in piattaforma, come già detto oggetto dei lavori [6], [7] e [8], si basano sul concetto della SB, e quindi è risultato necessario introdurre un volume fittizio all'interno del quale deve essere presente:

- L'ugello di rilascio del gas;
- Un ostacolo contro cui va ad impattare il getto di rilascio.

Il volume della SB inizia a valle dell'ugello di rilascio, e in direzione dell'asse del getto deve essere presente l'ostacolo. In particolare, l'eccentricità (cioè la distanza tra l'asse del getto uscente dall'ugello di rilascio e l'asse del cilindro-ostacolo) deve essere nulla.

Il dominio fittizio della SB non sarà presente nel caso reale; il rilascio avverrà direttamente da un ugello posizionato e bloccato nella posizione di interesse; per riprodurre quanto descritto, dovrà essere realizzato un pezzo speciale che possa rappresentare la nostra source box senza le pareti fisiche visibili in Figura 23.

Poiché la posizione della SB deve essere "flessibile", cioè si deve poter posizionare sul deck liberamente (nei limiti degli spazi lasciati liberi dagli ingombri) e deve allo stesso tempo, consentire sia il posizionamento dell'ostacolo cilindrico, si suggerisce di utilizzare una guida mobile che possa permettere:

- Regolare la distanza tra ugello di rilascio e ostacolo cilindrico;
- Tenere in posizione l'ostacolo, evitando che possa volare via a causa delle forze in gioco durante

la simulazione, ovvero, getto supersonico di rilascio e vento con velocità massima pari a 15m/s. Un esempio di posizionamento della SB è visibile in Figura 80.



Figura 80: Source Box, composta da ugello, staffa regolabile e Ingombro cilindrico (color ciano), su cui verrà posizionato il getto

La staffa che tiene insieme l'ugello e l'ingombro cilindrico, dovrà prevedere un sistema di fissaggio al deck tale da contrastare le forze in gioco presenti durante le simulazioni; inoltre, dovrà essere regolabile in lunghezza ed in altezza per effettuare il getto in varie posizioni predefinite. Un esempio è raffigurato in Figura 81.



Figura 81: Staffa regolabile per il posizionamento dell'ugello e dell'ingombro cilindrico

7. CONCLUSIONI

L'obiettivo della stesura del presente elaborato di tesi ha riguardato la progettazione definitiva del laboratorio SEASTAR, il cui scopo ultimo è la validazione dei modelli CFD sviluppati dal laboratorio di ricerca del SEADOG.

L'analisi dei lavori di tesi passati svolti all'interno delle attività di ricerca del SEADOG, cioè la definizione di modelli CFD innovativi basati sul concetto di "Source Box", è stata il punto di partenza per la comprensione dei parametri fisici, geometrici e delle grandezze di interesse da confrontare con i risultati sperimentali. La loro comprensione è stata fondamentale per la successiva identificazione dei requisiti funzionali che sono stati rispettati dalla progettazione.

Individuati i vincoli funzionali derivanti dalle simulazioni CFD, sono stati effettuati dei sopralluoghi in prima persona presso gli spazi messi a disposizione per la futura costruzione del laboratorio SEASTAR, i quali sono serviti a definire i vincoli costruttivi e le opere necessarie al soddisfacimento dei requisiti funzionali individuati. In particolare, in riferimento alle planimetrie e ai sopralluoghi in sede effettuati, sono stati individuati i vincoli per la progettazione fluidodinamica della galleria del vento, sulla base dei quali sono state basate le simulazioni CFD realizzate dal DIMEAS.

È stata, in parte, verificata la progettazione fluidodinamica della galleria del vento realizzata dal DIMEAS, confermando la "qualità" del flusso di vento prodotto in camera di prova, in termini di uniformità ed estensione del flusso, anche se il modello adottato non è riuscito a cogliere tutti i particolari del flusso uscente a valle del vano ventole; tale argomento potrebbe essere oggetto di ulteriori indagini, dando spazio a sviluppi futuri. Inoltre, la potenza elettrica richiesta per ricreare un flusso di vento con una velocità all'imbocco della piattaforma pari a 6 m/s, risulta essere prossima al limite di massima potenza elettrica prevista dal contratto di fornitura, e quindi l'identificazione di altre ventole presenti in commercio, caratterizzate da diverse curve di performance, potrebbe aiutare il rispetto di tale limite.

Sulla base del flusso di vento generato, è stata successivamente approfondita la progettazione del mockup sperimentale, la cui progettazione preliminare era stata argomento di precedenti lavori di tesi. Dall'analisi dei requisiti funzionali che devono essere assolti dal modello di piattaforma, è risultato cruciale realizzare un mockup versatile, garantire un alloggio stabile agli oggetti rappresentativi dei componenti presenti in una piattaforma off-shore per resistere al campo di vento della camera di prova, oltre che fornire un

apposito ingresso per l'ugello dal quale avverrà il rilascio della miscela di gas individuata, necessaria allo svolgimento delle prove sperimentali, e prevedere un sistema di interfacciamento con la sensoristica necessaria alla rilevazione delle grandezze di interesse, come la concentrazione del gas metano a bordo della piattaforma e il campo di moto. A tale scopo, è stata proposta una soluzione realizzativa per la costruzione del mockup, realizzata sulla base dei requisiti funzionali e strutturali individuati. L'eventuale fase di progettazione esecutiva sarà avviata non appena si saranno individuati, e scelti, i fornitori del mockup i quali potrebbero fornire differenti tipologie di soluzioni costruttive, frutto della loro esperienza in tale campo, da conciliare con i requisiti costruttivi e funzionali che deve assolvere il mockup, ai fini di ottenere un modello di piattaforma coerente sia con la realtà che con le simulazioni CFD.

Dunque, il lavoro di tesi si può considerare centrato, ed esso getterà le basi per ulteriori sviluppi futuri. Tra questi, si ha sicuramente lo sviluppo del documento di progettazione definitiva del laboratorio SEASTAR, in cui le ulteriori fasi di progetto previste riguarderanno: il sistema d'areazione, necessario al fine di smaltire le eventuali sacche di gas che si potrebbero formare in vicinanza del tetto della camera di prova in seguito al rilascio di gas a bordo della piattaforma; la sensoristica e l'elettronica a servizio delle prove sperimentali; il sistema di acquisizione e analisi dati, al fine di poter gestire tutta la fase sperimentale direttamente dalla sala di controllo; il sistema di distribuzione del gas, richiesto per ottenere il rilascio di gas alle condizioni operative individuate; individuazione delle opere civili richieste. Ulteriori sviluppi del lavoro prevedono un'analisi HAZOP sullo schema di impianto del lab SEASTAR al fine di individuare eventuali componenti critici ed intervenire prima della realizzazione dell'intera struttura, e un'analisi di manutenibilità. Una volta compiuti questi lavori, seguirà la costruzione del mock-up, delle opere civili e dell'impiantistica necessaria, e per ultimo una fase di collaudo prima dell'entrata in esercizio del laboratorio.

BIBLIOGRAFIA

- [1] IEA, «Global Energy and CO2 Status Report 2017», *Glob. Energy CO2 Status Rep. 2017*, n. March, 2017.
- [2] Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione Europea, *Direttiva 2013/30/UE del parlamento europeo e del consiglio sulla sicurezza delle operazioni in mare nel settore degli idrocarburi*, vol. 2013. Italia: Gazzetta ufficiale dell'Unione Europea, 2013, pagg. 66–106.
- [3] S. Guasco, «Towards the CFD simulation of accidents on off-shore platforms: dispersion of a turbulent jet hitting a flat plate», Politecnico di Torino, 2015.
- [4] E. Pederiva, «Towards the CFD simulation of accidents on off-shore platforms: dispersion of a turbulent jet hitting a cylinder», Politecnico di Torino, 2015.
- [5] T. Corti, «CFD modelling of accidental events in oil&gas environment: definition of a source box», Politecnico di Torino, 2016.
- [6] C. Rupolo, «Modellizzazione CFD per lo studio di rilasci di gas compresso in piattaforme Oil & Gas offshore», Politecnico di Torino, 2018.
- [7] E. Carrozza, «Modellazione CFD per lo studio di rilasci e dispersione atmosferica di inquinanti in piattaforme», Politecnico di Torino, 2018.
- [8] A. Moscatello, «Modellazione CFD di rilasci incidentali di gas infiammabili e tossici in piattaforme Oil&Gas», Politecnico di Torino, 2018.
- [9] 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, 2018.
- [10] N. Bono, «Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti oil&gas offshore», Politecnico di Torino, 2018.
- [11] Politecnico di Torino, «Sicurezza degli impianti di estrazione di idrocarburi in mare la DGS UNMIG del MISE e il Politecnico di Torino lanciano il Centro multidisciplinare SEASTAR», 2018.
- [12] G. Giacchetta, P. Macini, e E. Mesini, «La sicurezza delle operazioni in mare nel settore idrocarburi e la nuova direttiva europea 2013/30/UE», Università di Bologna, 2013.
- [13] E. Ufuah, «Fundamental Behaviour of Offshore Platform Steel Decks Under Running Pool Fires», University of Manchester, 2012.
- [14] GlobalEnergy, «https://www.globalsecurity.org/military/». 2018.
- [15] DrillingFormulas, «http://www.drillingformulas.com/». 2018.
- [16] offspringinternational, «http://www.offspringinternational.com». 2018.
- [17] Api, «https://www.api.org/oil-and-natural-gas/». 2018.
- [18] M. Cocuzza, L. Scaltrito, S. Ferrero, e S. L. Marasso, «Stato dell'arte e prospettive di innovazione nel monitoraggio ambientale, fire&gas per impianti offshore», Politecnico di Torino.
- [19] P. F. Barnaba, «Cenni storici sull'esplorazione petrolifera in Italia», 2011.

- [20] MISE DGS, «Elencro strutture marine ammissibili, MISE». 2018.
- [21] Mise, «Report Ministero delo Sviluppo Economico». .
- [22] Cae, «https://www.cae.it/ita/case-history/eni-s.p.a.-cs-7.html». 2018.
- [23] T. H. Trung e T. V. Bui, «Application of quantitative risk assessment approach on off-shore Oil & Gas industry, 2014», n. October, 2014.
- [24] D. Salmon e Lord Cullen House Aberdeen, «HSE Information sheet Guidance on Risk Assessment for Offshore Installations This information sheet provides guidance for Asset Managers, Safety Managers and Safety Engineers in the offshore industry on suitable and sufficient risk assessment, particularl», n. 3, 2006.
- [25] A. Carpignano, Risk Analysis Booklet. .
- [26] G. Sobrero, «Dispense: Localizzazione e Impatto Ambientale dei Sistemi Energetici Rilasci non istantanei».
- [27] E. Franquet, V. Perrier, S. Gibout, e P. Bruel, «Free underexpanded jets in a quiescent medium: A review», *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 77, pagg. 25–53, 2015.
- [28] J. Choi, N. Hur, S. Kang, E. D. Lee, e K. B. Lee, «A CFD simulation of hydrogen dispersion for the hydrogen leakage from a fuel cell vehicle in an underground parking garage», *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 38, n. 19, pagg. 8084–8091, 2013.
- [29] ISPRA, «Rete Mareografica Nazionale». 2018.
- [30] Windfinder, «https://it.windfinder.com/windstatistics». 2018.
- [31] S. Grist e P. M. Sherman, «Study of the Highly Underexpanded Sonic Jet», *AIAA J.*, vol. 4, n. 1, 2013.
- [32] J. H. F. 1, Computational Methods for Fluid Dynamics. 2002.
- [33] ANSYS, «Fluent User Guide». .